



3462 - 252 81

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE,
MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG

Rißbreitenbeschränkung im Stahlbetonbau
durch Faserarmierung

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. K. Hartwich

Juni 1984

Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des
Landes Niedersachsen

Inhaltsverzeichnis

1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

2. VERSUCHSPROGRAMM

3. HERSTELLUNG DER VERSUCHSKÖRPER

4. BAUSTOFFE

4.1 Beton

4.2 Betonstahl

4.3 Stahlfasern

5. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1 Prüfraumen, Belastungsvorrichtung

5.2 Messungen

5.2.1 Kraftmessung

5.2.2 Messung der Betondehnungen

5.2.3 Rißbreitenmessung

5.3 Kraftgesteuerter zentrischer Zugversuch, Versuchsablauf

6. DARSTELLUNG UND BEURTEILUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

6.1 Normalkraft-Verformungs-Beziehung

6.1.1 Grundsätzliches zum Messen der Betondehnungen

6.1.1.1 Einfluß der Belastungsart

6.1.1.2 Einfluß der Länge der Meßbasis und der Lage der Meßlinien

6.1.1.3 Zeitabhängige Verformungen

6.1.2 Gemessene Normalkraft-Dehnungslinien

6.1.3 Vergleich der versuchsmäßig bestimmten N - ϵ_m -Linien mit rechnerischen Näherungen

6.2 Rißbildung

6.2.1 Rißbilder

6.2.2 Rißabstand s_{rm}

6.2.3 Rißbreiten

6.3 Dehnsteifigkeit

7. ZUSAMMENFASSUNG

8. LITERATUR

Bezeichnungen

1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Stahlbetontragglieder weisen häufig bereits unter Gebrauchslast Risse infolge Last- und/oder Zwangbeanspruchungen auf. Aus Gründen des Korrosionsschutzes der Bewehrung sind die Rißbreiten in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen auf ein zulässiges Maß zu beschränken. Hieraus ergeben sich in bestimmten Fällen (z.B. Temperaturzwang) große erforderliche Bewehrungsmengen bzw. eine ungünstige und unwirtschaftliche Begrenzung des Bewehrungsstahldurchmessers.

Aus vorangegangenen Forschungsarbeiten [1],[2] ist bekannt, daß durch eine zusätzliche Stahlfaserarmierung die Rißbreiten erheblich reduziert werden können. In den o.g. Untersuchungen wurden Versuche an Biegebalken und Zuggliedern durchgeführt, deren Querschnitte insgesamt aus Faserbeton hergestellt wurden und deren Querschnittsabmessungen aber deutlich geringer als die in der Praxis üblichen waren.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die Reduzierung der Rißbreiten an Versuchskörpern mit praxisnahen Abmessungen (z.B. gesamte Zugzone eines Plattenbalkens) quantitativ zu erfassen. Aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus ist es sinnvoll, derartige Bauteile nicht insgesamt aus Faserbeton herzustellen. Vielmehr wird nur der unmittelbar den vor Korrosion zu schützenden Bewehrungsstahl umgebende Bereich ("wirksame Betonzugzone") in Faserbeton gefertigt werden, der übrige Querschnittsbereich wird aus gewöhnlichem Beton hergestellt. Der vorliegende Forschungsbericht soll einen Beitrag zur Klärung des Dehn- und Rißverhaltens von Stahlbetontraggliedern aus Faserbeton mit o.g. Querschnittsformen liefern.

2. VERSUCHSPROGRAMM

Für die Rißbildung in einem Stahlbetonbauteil sind eine Vielzahl von Einflüssen maßgebend. Zum einen wird sie von außen, wie beispielsweise die Art der Belastung (Kurzzeitbelastung, Dauerlast, schwingende Belastung) oder dem Vorhandensein von Vorschädigungen infolge Temperatur- und/oder Schwindeigenspannungen, zum anderen von innen, d.h. durch die geometrischen und stofflichen Vorgaben des Bauteils bestimmt.

Die seitens des Bauteils vorgegebenen, die Rißbildung im wesentlichen beeinflussenden Parameter sind die Betonfestigkeit, die Bewehrungsart (glatt, profiliert, gerippt), der Bewehrungsgehalt, der Bewehrungsdurchmesser, die Bewehrungsanordnung und, wie in [1] aufgezeigt werden konnte, bei Verwendung von Faserbeton der Fasergehalt.

Durch die nachstehend beschriebenen Versuche soll geklärt werden, ob bei Verwendung von Faserbeton der Durchmesser der Bewehrungsstäbe vergrößert werden kann, ohne daß der Korrosionsschutz durch Überschreiten der kritischen Rißbreiten beeinträchtigt wird. Die als Versuchskörper gewählte Betonscheibe mit an den Schmalseiten konzentrierter Bewehrungsanordnung ist als spiegelbildliche Verdoppelung der Biegezugzone eines hohen Plattenbalkens zu verstehen. An diesen symmetrisch bewehrten Querschnitten wurden zentrale Zugversuche durchgeführt, durch die die freie Rißentwicklung - unbeeinflußt durch Schnittkraft- und/oder Spannungsgradienten - in Abhängigkeit von den wesentlichen Stahlbetonparametern studiert werden konnte. Eine Übersicht über die Querschnitte der fünf Versuchskörper ist in der Abb. 2.1 gegeben.

Alle fünf Versuchskörper besaßen einen Bewehrungsgrad μ_s von rd. 1 %. Die Betonstähle besaßen Durchmesser d_s von 10 mm, 20 mm und 28 mm; der Quotient d_s/μ_s wies somit Werte von 99, 200 und 286 auf. Der verwendete Faserbeton wurde mit geraden Fasern mit einem

Volumenanteil von 1,5 % hergestellt. Das sowohl für die Frisch- als auch für die Festbetoneigenschaften wichtige Verhältnis von Faserlänge l_f * Volumenanteil μ_f zu Faserdurchmesser d_f belief sich auf $\mu_f \times l_f / d_f = 93,8$. Eine Zusammenstellung der Querschnittswerte ist der Tab. 2.1 zu entnehmen.

Untersucht wurde das Dehn- und Rißverhalten in Abhängigkeit von der Höhe der Belastung. Darüber hinaus wurde auch der Einfluß einer schwingenden Beanspruchung auf die Ausbildung und Breite von Rissen studiert.

3. HERSTELLUNG DER VERSUCHSKÖRPER

Die Versuchskörper besaßen einen Rechteckquerschnitt von $b/d = 20/63$ cm. Die Gesamtlänge der Körper betrug 3,50 m, wovon die mittleren 2,50 m als Meßbasis dienten. Längsschnitte und Querschnitte sind in den Abb. 2.1 und 3.1 dargestellt.

Die Versuchskörper wurden, auf ihrer Breitseite liegend, betoniert. Die über die gesamte Länge durchgehende Hauptbewehrung wurde in kurzen Abständen an dünnen Drähten abgehängt; die genaue seitliche Positionierung wurde mittels Abstandshalter gewährleistet. Zur besseren Krafteinleitung wurden in den Endbereichen jeweils zusätzlich 12 Bewehrungsstäbe auf einer Länge von 50 cm angeordnet. Sowohl die Hauptbewehrung als auch die Einleitungsbewehrung ragte beidseitig aus den Zugkörpern heraus. Sie wurden später durch Kopfplatten (s. Abb. 3.2) gesteckt und mit diesen kraftschlüssig verschweißt.

Bei der Betonage der Versuchskörper mit Faserbeton wurden zuerst die durch Bleche abgeschotteten Randbereiche mit Faserbeton verfüllt. Anschließend wurde der Mittenbereich mit Normalbeton aufgefüllt. Dann erfolgte das Verdichten der Betone. Danach wurden die Trennbleche gezogen. Durch vorsichtiges Stochern im Bereich der Betonierfuge sollte dann eine bessere Verzahnung der beiden

Bereiche erzielt werden. Die beiden Versuchskörper, die ausschließlich aus Normalbeton hergestellt wurden, wurden im Rand- und Mittenbereich in einem Zug betoniert und verdichtet.

Die Versuchskörper wurden nach der Betonage etwa 7 Tage mit feuchten Tüchern abgedeckt, anschließend lagerten sie bis zum Tag der Versuchsdurchführung in der Prüfhalle. Die gleichzeitig hergestellten Begleitprobekörper wurden im Normklima gelagert.

4. BAUSTOFFE

4.1 Beton

Zur Herstellung des Betons wurde ein Portlandzement PZ 35 F verwendet.

Das Kies-Zuschlaggemisch besaß ein Größtkorn von 16 mm. Die Kornverteilung wurde so gewählt, daß sie im Bereich < 4 mm möglichst der Regelsieblinie B₁₆ nach DIN 1045 entsprach. Die Kornzusammensetzung > 4 mm orientierte sich an der Sieblinie C₁₆. Eine tabellarische Übersicht sämtlicher Kornzusammensetzungen und der zugehörigen Grenzsieblinien ist der Tab. 4.1 zu entnehmen.

Sowohl die Faserbetone (FB) als auch die Normalbetone (NB) besaßen die gleiche Betonzusammensetzung. Bei den Faserbetonen wurden lediglich während des Mischvorgangs die Stahlfasern zugestreut. Die Konsistenz der Faserbetone wurde durch Zugabe des Betonverflüssigers "Addiment" der Heidelberger Zement-AG so eingestellt, daß genau wie bei den Normalbetonen ein leicht zu verdichtender Beton der Konsistenz K 3 erreicht wurde. In Tab. 4.2 ist die Zusammensetzung des verdichteten Frischbetons angegeben.

Die in der Tab. 4.3 aufgeführten Druckfestigkeitswerte β_D wurden i.d.R. am ersten Tag der Versuchsdurchführung an Würfeln mit einer Kantenlänge von 15 cm ermittelt.

Die zentrische Zugfestigkeit β_z des Betons wurde zu Versuchsbeginn an zylindrischen Probekörpern $\emptyset/h = 15/30$ cm bestimmt. Hierzu wurden Stahlplatten an die Stirnflächen der Probekörper geklebt. Um ein vorzeitiges Versagen in der Klebefuge zu vermeiden, waren die Probekörper auch seitlich auf ca. 2 cm Höhe über eine Stahlmanschette mit den Kopfplatten verklebt. Die Belastung erfolgte mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit zügig bis zum Bruch.

Während beim Erreichen der maximalen Last die Normalbetonzugproben schlagartig in zwei Teile zertrennt wurden, wiesen die Faserbetone auch nach dem Reißen eine gewisse Resttragfähigkeit auf.

Zum Vergleich mit den Festigkeitswerten der Zugproben sind die Betonzugfestigkeiten β_z^{N1} aus den Erstrißlasten der großen Versuchskörper errechnet worden. Der Rechengang hierzu ist in Tab. 4.4 aufgeführt. Hieraus ergeben sich erwartungsgemäß wesentlich niedrigere Zugfestigkeiten als an den Begleitproben ermittelt worden sind.

Die Tab. 4.4 enthält die Zusammenstellung der Elastizitätsmoduli, der Zugfestigkeiten und der Verhältniszahlen $n = E_s/E_b$ der Betone, die aus den Erstrißlasten und den dazugehörigen Verformungen der Versuchskörper bestimmt wurden.

4.2 Betonstahl

Es wurden gerippte Betonstähle der Güte BSt 420/500 RU in den Durchmessern 10 mm, 20 mm und 28 mm verwendet. Die Stähle wurden entsprechend DIN 488 geprüft. Die Spannungs-Dehnungsdiagramme und die Materialkennwerte können der Tab. 4.5 entnommen werden.

4.3 Stahlfasern

Für die Herstellung des Faserbetons wurden ausschließlich gerade Wirex-Stahlfasern der Firma Trefil-ARBED, Köln, verwendet. Die

Faser besitzt eine Länge von 25 mm und einen Durchmesser von 0,4 mm; das Verhältnis l_f/d_f beträgt somit 62,5. Das Material der Faser ist blankgezogener Stahldraht mit einer vom Hersteller angegebenen Mindestzugfestigkeit von 1000 N/mm².

3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1 Prüfraumen, Belastungsvorrichtung

Alle Versuchskörper wurden hängend einem zentrischen Zugversuch unterworfen. Der Prüfraumen bestand aus einem stählernen Prüfgerüst und dem Spannboden der Prüfhalle. Eine Übersichtszeichnung ist der Abb. 5.1 zu entnehmen.

Zur Belastung wurde ein 500 kN-Prüfzylinder verwendet. Dieser drückte gegen die Unterseite des Spannbodens auf einen Hebel, so daß die in den Versuchskörper eingeleitete Zugkraft der doppelten Zylinderdruckkraft entsprach. Die Zugkraftübertragung erfolgte durch Spannstähle \varnothing 32 mm mit aufgerolltem Gewinde. Die Spannstähle wurden mit den Kopfplatten des Zugkörpers mittels Kuppelungen und Bolzen \varnothing 50 mm verbunden.

5.2 Messungen

5.2.1 Kraftmessung

Die Zugkräfte wurden mittels einer Kraftmeßdose, die sich am oberen Aufhängepunkt der Versuchskörper befand (s. Abb. 5.1), gemessen. Bei den in den Tabellen aufgeführten Zugkraftwerten ist bereits das halbe Eigengewicht des Versuchskörpers berücksichtigt worden. Hierdurch wird ein mittlerer Beanspruchungszustand des Zugkörpers innerhalb der Meßstrecke erfaßt.

5.2.2 Messung der Betondehnungen

Die Gesamtdehnung des Versuchskörpers wurde mit zwei voneinander unabhängigen Systemen gemessen. Auf einer Meßbasis von 2500 mm

wurde die Verformung mit zwei Weggebern und zwei Meßbuhren (1/100 mm Teilung) erfaßt. Gemessen wurde die gegenseitige Verschiebung zweier Meßrahmen, die mit je drei Schrauben an dem Versuchskörper befestigt waren. An dem einen Meßrahmen waren die Weggeber und Meßbuhren montiert, an dem anderen Meßstangen \varnothing 10 mm zur Überbrückung der Meßbasis (s. Abb. 5.2 bis 5.4). Die induktiven Weggeber waren über Meßverstärker mit Zeit-Linien- und xyy-Schreibern verbunden.

Zusätzlich zu der zuvor geschilderten integralen Dehnungsmessung wurde die Dehnung an der Betonoberfläche durch Setzdehnungsmesser (Basis 500 mm, mechanisch) auf einer Gesamtbasis von 2000 mm gemessen. Durch die Setzdehnungsmessungen wurden Dehnungsunterschiede über die Versuchskörperlänge und zwischen dem Randbereich und dem Mittenbereich des Versuchskörpers infolge Rißbildung erfaßt.

5.2.3 Rißbreitenmessung

Nach Anfahren einer Laststufe wurden neu entstandene Risse auf den Versuchskörper angezeichnet und in ein Protokoll übertragen. Die erste Messung nach Entstehen eines Risses auf einer der zehn Meßlinien erfolgte mit einer elektronischen Meßkamera. Der Riß wurde dabei auf einem Monitor in 33-facher Vergrößerung abgebildet. Die Rißbreite konnte dann mit einem Meßraster (2/100 mm Teilung) bestimmt werden. Anschließend wurde auf der Meßlinie an beiden Rißufern Setzdehnungsmeßplättchen aufgeklebt. Die Rißaufweitung in den höheren Laststufen wurde dann mit einem Setzdehnungsmesser vom Typ Tensotest (Meßbasis 50 mm, 1/1000 mm Teilung) verfolgt.

5.3 Kraftgesteuerter zentrischer Zugversuch, Versuchsablauf

Der Versuchsbeginn lag i.d.R. 28 Tage nach dem Betoniertermin. Für die Versuchsdurchführung wurden jeweils 6 Tage benötigt.

Die Versuche wurden kraftgesteuert gefahren, d.h., es wurden bestimmte Laststufen angefahren, während der die Belastung für die Durchführung der Messungen konstant gehalten wurde. Die Zugkraft wurde zügig mit geringer Belastungsgeschwindigkeit so lange gesteigert, bis die Aufzeichnungen des xyy-Schreibers eine rasche Zunahme der Gesamtdehnung ϵ_m - verursacht durch Rißbildung - anzeigten. Obgleich das Dehnungsverhalten der Zugkörper sehr aufmerksam verfolgt wurde, ist davon auszugehen, daß die tatsächliche den ersten Riß auslösende Kraft geringfügig kleiner ist, da bei allen Versuchskörpern immer gleich mehrere Risse gefunden wurden. Im folgenden wird dennoch diejenige Zugkraft als Erstrißlast bezeichnet, bei der die erste Rißbreitenmessung vorgenommen wurde.

Von der Erstrißlast ausgehend, wurde die Last stufenweise erhöht. Im Anschluß an die letzte Messung eines Tages wurden die Versuchskörper entlastet, am nächsten Tag ist dann die nächste höhere Laststufe aufgebracht worden. Bei einer Last, die einer bezogenen Normalkraft $N/A_s \approx 310 \text{ N/mm}^2$ entsprach, wurden die Versuchskörper auf $N/A_s \approx 125 \text{ N/mm}^2$ teilentlastet. Zwischen diesen beiden Lastniveaus sind innerhalb einer Stunde insgesamt fünfzig Lastwechsel ausgeführt worden. Anschließend wurden weitere hunderttausend Lastwechsel mit einer Frequenz von 0,5 Hz und einer Spannungsamplitude von 60 N/mm^2 durchgeführt. Nach den Lastspielzahlen 50 , 10^3 und 10^5 wurden sowohl bei der Oberlast als auch bei der Unterlast die Rißbreiten auf ausgewählten Linien gemessen. Der Zugversuch wurde bei Erreichen der Fließlast der Hauptbewehrung beendet.

Der Ablauf der Messungen erfolgte immer in derselben Reihenfolge: Nach Erreichen einer Laststufe wurden die neu aufgetretenen Risse angezeichnet, die Meßplättchen für das Tensotast-Meßgerät geklebt, die Rißbreite mit der elektronischen Kamera aufgenommen und anschließend sämtliche Rißbreiten mit dem Tensotast-Gerät bestimmt. Dann wurde die Gesamtdehnung ϵ_m mit dem Setzdehnungs-

messer (SDM) gemessen. Als letztes wurde die Gesamtdehnung der Zugkörper aus den Werten der Meßuhren und der Weggeber ermittelt.

6. DARSTELLUNG UND BEURTEILUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

6.1 Normalkraft-Verformungs-Beziehung

6.1.1 Grundsätzliches zum Messen der Betondehnungen

6.1.1.1 Einfluß der Belastungsart

Das Last-Verformungsverhalten zentrisch gezogener Stahlbetonkörper kann sowohl anhand von kraftgesteuerten als auch von dehnungs- bzw. weggesteuerten Versuchen untersucht werden, wenn von den folgenden Voraussetzungen ausgegangen werden kann: Der Beton sei bis zum Bruch unter der Zugfestigkeit β_{bz} elastisch. Der Bewehrungsstahl verhalte sich ideal-elastisch-plastisch. Der Verbundstoff Stahlbeton zeige auch im Zustand II zwischen zwei Rißlasten ein elastisches Verhalten.

Die Abb. 6.1 verdeutlicht, welche Last-Verformungspfade in Abhängigkeit von der Belastungsart beschriftet werden. Beim lastgesteuerten Versuch wird sich beim Erreichen der Erstrißlast N^1 ein spontaner Dehnungssprung bei unveränderter Normalkraft einstellen. Wird die Belastung gesteigert, so folgt der Dehnungsverlauf einer Geraden, deren Steigung durch die für den momentanen Rißzustand geltende Dehnsteifigkeit K_D bestimmt wird. Für alle höheren Rißlasten wird sich ein entsprechendes Dehnverhalten einstellen, wobei mit zunehmender Rißanzahl die Dehnsteifigkeit K_D abnimmt und sich ihrem unteren Grenzwert $K_{DS} = E_s \cdot A_s$ (reiner Zustand II) allmählich annähert. Im kraftgesteuerten Zugversuch wird die $N-\epsilon_m$ -Linie somit einen treppenstufenartigen Verlauf zwischen der Erstrißlast N^1 und der Fließlast der Bewehrung N_s aufweisen.

Das Dehverhalten des weggesteuert geprüften Stahlbetonzuggliedes ist dadurch gekennzeichnet, daß bei Erreichen einer Rißlast die

Normalkraft sprungartig abfällt. Für eine unendlich steife Versuchsvorrichtung würde sich ein vertikaler Steilabfall einstellen. Wie in Abb. 6.1 dargestellt ist, wird jedoch i.d.R. mit dem Lastabfall eine Dehnungszunahme einhergehen. Bei Steigerung des vorgegebenen Dehnweges folgt die $N-\epsilon_m$ -Linie auch in diesem Fall der Geraden, die die Dehnsteifigkeit für den augenblicklichen Rißzustand charakterisiert. Die in einem weggesteuerten Versuch gemessene Normalkraft-Verformungs-Linie weist einen sägezahnartigen Verlauf zwischen der Erstrißkraft und der Fließlast der Bewehrung auf.

Dehnungssprung beim kraftgesteuerten Versuch und Abfall der Last beim weggesteuerten Versuch, werden in ihrer Größe zum einen durch den Versuchskörper selbst, z.B. durch die Länge, zum anderen durch die Versuchsvorrichtung bestimmt. Für beide Versuchsarten ergibt sich jedoch unter Zugrundelegung der eingangs erwähnten Voraussetzungen eine gemeinsame obere Hüllkurve für beide versuchsmäßig gewonnenen $N-\epsilon_m$ -Verläufe. Sie kann als "Stoffgesetz" für den zentrisch gezogenen Stahlbetonstab angesetzt werden. Ihr Verlauf wird i.W. durch die Betonzugfestigkeit sowie deren Variation über die Länge des Stahlbetonstabes, durch den Bewehrungsgrad und durch die Verbundgüte der Bewehrung vorgegeben.

Alle im folgenden angestellten theoretischen Überlegungen beziehen sich auf das oben dargestellte modellhafte Dehnverhalten des Stahlbetonzugstabes und der oberen Hüllkurve als die maßgebende $N-\epsilon_m$ -Linie.

Eine Reihe weiterer, den komplexen Rißprozeß und damit das Zugdehnverhalten von Stahlbeton bestimmender Einflüsse konnten bei der Auswertung der Versuche nur z.T. berücksichtigt werden. Einige sollen in den folgenden Abschnitten nur kurz erläutert und mit Beispielen belegt werden.

6.1.1.2 Einfluß der Länge der Meßbasis und der Lage der Meßlinien

Im Abschnitt 5.2.2 wurde bereits beschrieben, daß die Dehnung der Versuchskörper sowohl integral mit Weggebern und Meßuhren auf einer Meßbasislänge von 2500 mm als auch abschnittsweise mittels eines Setzdehnungsmesers (SDM) mit einer Einzelmeßbasis von 500 mm und einer Meßkettenlänge von 2000 mm auf jeder der vier Seitenflächen gemessen worden ist (s. Abb. 5.2).

Durch beide Meßverfahren werden mittlere Betondehnungen auf der Betonoberfläche gemessen. In diesen Dehnungen sind zum einen die Rißbreiten, zum anderen die Verformungen des zwischen den Rissen auf Zug beanspruchten Betons enthalten, wobei die Rißbreiten anteilig den weitaus größten Verformungsbeitrag liefern. Wegen der Zufälligkeit der Rißbildung können somit über die Länge eines Versuchskörpers in Abhängigkeit von der Länge der Meßstrecke und deren Position recht unterschiedliche Dehnwerte bestimmt werden. Die Größe der Abweichungen wird bei kurzen Meßstrecken größer sein als bei langen. Ebenso werden die Unterschiede bei Meßlinien mit wenigen breiten Rissen stärker ausfallen, verglichen mit denen auf Meßlinien, auf denen sich viele schmale Risse befinden.

In den Abb. 6.2 und 6.3 sind zwei Beispiele für die Dehnungsverteilung über die Versuchskörperlänge dargestellt. Man erkennt, daß die Dehnungsdifferenzen zwischen den Teilmeßstrecken der Meßkette I - hier wird die Betondehnung im Bereich der konzentriert angeordneten Bewehrung bestimmt - deutlich kleiner als bei der Meßkette II sind, die in einem großen Abstand von der Bewehrung verläuft. Der Grund dafür ist, daß sich innerhalb der Meßkette I viele Risse mit geringer Rißbreite befunden haben, während sich in der Meßkette II nur wenige Sammelrisse mit großer Rißbreite gebildet haben. Außerdem verdeutlichen die Abbildungen, daß Differenzen in den Dehnwerten für niedrige Beanspruchungen am größten ausfallen bei höherer Belastung, insbesondere wenn nur wenige breite Risse vorhanden sind (SDM-Meßkette II), die absolut sehr große Werte annehmen können.

In den Abb. 6.4 bis 6.7 sind die mittleren Dehnungen, die mit dem Setzdehnungsmesser auf den Mittelachsen der Versuchskörperseitenflächen gemessen wurden, in Abhängigkeit von der Beanspruchung dargestellt. Die Abweichungen der gemessenen Dehnwerte sind bei zwei Versuchskörpern nur gering (ZK 20/0; ZK 20/1,5), bei den beiden anderen wurden Differenzen zwischen 9 % und 20 % ermittelt. Die absolute Größe der Unterschiede nimmt mit der Belastung - der Rißbreite - zu. Daß die Dehnungen auf den breiten Seitenflächen denen auf den schmalen vorseilen bzw. auch das gegenteilige Verhalten, konnte für alle Versuchskörper nicht einheitlich festgestellt werden.

Zusammenfassend sei vermerkt: Die Dehnungen eines Stahlbetonzugstabes im Zustand II variieren über die Versuchskörperlänge. Die Dehnungsdifferenzen werden in ihrer Größe i.W. von der Länge der Teilmeßstrecke und von Anzahl und Breite der Risse bestimmt.

6.1.1.3 Zeitabhängige Verformungen

Bei der Durchführung der Versuche konnte bei jeder Laststufe neben den spontanen Dehnungen infolge der Steigerung der Belastung eine deutliche Zunahme der Verformungen während des Haltens der Last beobachtet werden. Die Entwicklung der Dehnung über die Zeit ist aus Abb. 6.8 ersichtlich.

Die Ursachen für diese zeitabhängigen Verformungen liegen in der Verminderung der Betonzugfestigkeit infolge Dauerstandbelastung, im Zug-Kriechen des Betons und in der Verweichung des Verbundes infolge Verbundkriechen.

Unter einer Dauerlast verringert sich nach [3] die Tragfähigkeit eines gezogenen Betonprismas bis zu 30 bis 40 %. Im Zustand anfänglicher Rißbildung trägt der Beton zwischen den Rissen über weite Bereiche voll mit. Er erfährt hierbei Betonzugspannungen in der Höhe der Kurzzeitfestigkeit. Im kraftgesteuerten Zugversuch

führt dies zu zusätzlichen Rißbildungen während der Standzeit der Belastung (s. Abb. 6.8). Bei weggesteuerten Versuchen wirkt sich dieser Effekt so aus, daß bei erneuter Steigerung der Dehnungen die vorhergehende Rißlast nicht überschritten wird bzw. nicht einmal erreicht wird. Dieses führt zu dem häufig beobachteten Lastplateau bei anfänglicher Rißbildung.

Das Kriechen des Betons unter Dauerzug führt zur allmählichen Vergrößerung der Dehnwerte. Ebenso verursacht das Verbundkriechen einen stetigen Dehnungszuwachs dadurch, daß infolge Verweichung des Verbundes die mittlere Betonzugspannung verringert wird und somit die Mitwirkung des Betons abnimmt.

Die im Abschn. 6.1.1 dargelegten Einflüsse auf das Verformungs- und Rißverhalten zeigen, daß die im Versuch gemessenen Dehnungen immer im Zusammenhang mit der Versuchsdurchführung und der dabei verwendeten Meßtechnik zu betrachten sein.

6.1.2 Gemessene Normalkraft-Dehnungslinien

In den Abb. 6.9 bis 6.13 sind die gemessenen Normalkraft-Dehnungsverläufe der Versuchskörper dargestellt. Die durchgezogenen Linien geben die $N-\epsilon_m$ -Linien wieder, wie sie sich aus den kontinuierlichen Aufzeichnungen des xyy-Schreibers ergeben. Man erkennt den für den kraftgesteuerten Zugversuch typischen treppenförmigen Verlauf. Die mit den Setzdehnungsmessern (SDM) auf den schmalen Seitenflächen (s. Abschn. 6.1.1.2) unmittelbar vor der Laststeigerung bestimmten Dehnwerte ergeben den gestrichelt dargestellten Kurvenverlauf.

Theoretisch müßten die SDM-Dehnwerte mit denen der Weggebermessung (WG), die sich jeweils am rechten Ende des horizontalen Kurvenverlaufes befinden, übereinstimmen. Dieses kann i.d.R. aber schon aus den in Abschn. 6.1.1.2 gegebenen Gründen nicht zutreffen, da mit den Weggebern über eine Meßbasis von 2,5 m Länge, hingegen mit den Setzdehnungsmessern nur über 2,0 m gemessen

wurden. Außerdem hat sich gezeigt, daß die Weggebermessungen gegen Störungen anfällig waren, die z.B. durch Berührung der Meßstangen bzw. der Meßrahmen oder durch kurzzeitige Temperaturschwankungen entstehen. Deshalb sind mit den Weggebern gewonnene Meßergebnisse lediglich zur Ermittlung der zeitabhängigen Verformungen benutzt worden, während für die übrige Versuchsauswertung die SDM-Meßwerte ausgewählt wurden (s. Tab. 6.1 bis 6.5).

Die beim Versuchskörper ZK 10/1,5 feststellbare, deutliche Abweichung der SDM-Dehnwerte von denen der Weggeber, ist damit zu erklären, daß bei diesem als ersten durchgeführten Versuch die Befestigung der Meßrahmen noch im Mittenbereich der Breitseite des Versuchskörpers, in dem sich nur wenige Risse mit großer Breite befinden, angeordnet war. Bei den übrigen Versuchen waren die Befestigungsschrauben entsprechend Abb. 5.2 angebracht. Im allgemeinen übersteigt die Differenz zwischen den beiden gemessenen Dehnwerten nicht einen Wert, der in etwa der jeweiligen mittleren Rißbreite entspricht.

Bei der Betrachtung der mit dem Setzdehnungsmesser gemessenen $N-\epsilon_1$ Verläufe fällt auf, daß offensichtlich die Erstrißkraft unabhängig davon ist, ob der Versuchskörper im Randbereich aus Faserbeton oder Normalbeton besteht. Hierzu sei jedoch angemerkt, daß bei den Zugkörpern mit Faserbeton zuerst Risse nur im aus Normalbeton bestehenden Mittenbereich auftraten, während im Faserbeton keine Risse sichtbar waren.

Der Dehnungssprung nach Erreichen der Erstrißlast war einheitlich bei allen faserbewehrten Versuchskörpern deutlich geringer als bei den übrigen Versuchskörpern. Dies liegt daran, daß, wie oben erwähnt wurde, der Faserbeton entweder überhaupt nicht gerissen war oder aber sich die Stahlfasern im Rißquerschnitt an der Kraftübertragung beteiligten und damit insgesamt den Steifigkeitsverlust infolge Rißbildung verminderten. Auf die Fähigkeit von Faserbeton, auch im gerissenen Zustand Kräfte übertragen zu können, ist in Abschn. 4.1 bereits hingewiesen worden.

Die Mitwirkung des Betons drückt sich im horizontalen Abstand der $N-\epsilon_m$ -Linie von der Kennlinie des Bewehrungsstahls aus (s. Abb. 6.1). Aus den Darstellungen wird deutlich, daß die Mitwirkung mit Zunahme der Belastung abnimmt. Ebenso ist eine Abnahme der Mitwirkung durch eine schwingende Beanspruchung zu verzeichnen.

Den Verlust an Dehnsteifigkeit $K_D = N/\epsilon_m$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel verdeutlicht die Abb. 6.14. Die Verweichung des Stahlbetonzugstabes infolge einer pulsierenden Normalkraft drückt sich gleichfalls im Anstieg der Dehnungsdifferenz zwischen Oberlast und Unterlast aus (s. Abb. 6.15).

In den Abb. 6.9 bis 6.13 sind auch die Kraftverformungslinien der Versuchskörper eingezeichnet, bei denen die während der Standzeit einer Laststufe aufgetretenen Kriechdehnungen (s. Abb. 6.9) eliminiert wurden. Abb. 6.16 zeigt schematisch den Weg der Bereinigung der Dehnwerte auf. Die Korrektur erfolgt an den SDM-Dehnwerten, wobei die zeitabhängigen Verformungsanteile aus den WG-Messungen bestimmt wurden.

6.1.3 Vergleich der versuchsmäßig bestimmten Normalkraft-Dehnungslinien mit rechnerischen Näherungen

Die i.a. verwendeten rechnerischen Näherungslösungen für die $N-\epsilon$ -Beziehung gehen, wie bereits in Abschn. 6.1.1.1 näher erläutert worden ist, von einem reinen elastischen, d.h. zeitunabhängigen Verhalten des gerissenen Stahlbetonstabes aus. Ein Vergleich dieser Linien mit versuchsmäßig bestimmten Normalkraft-Dehnungsverläufen erscheint daher nur sinnvoll, wenn man die gemessenen Dehnungen um die Anteile infolge Kriechens verringert. Dieses gilt insbesondere dann, wenn die Versuchsdurchführung sich, wie im vorliegenden Fall, über mehrere Tage erstreckte. In den Abb. 6.17 bis 6.21 sind die entsprechend Abschnitt 6.1.2 um die Kriechanteile bereinigten $N-\epsilon_m$ -Linien den theoretischen Kurvenverläufen gegenübergestellt.

Infolge der Mitwirkung des Betons auf Zug verringert sich die mittlere Dehnung ϵ_m des Stahlbetonstabes um einen Betrag $\Delta\epsilon$ gegenüber der Stahldehnung ϵ_{SR} im Rißquerschnitt. In diesem Bericht soll der Vereinheitlichung halber auch für die Versuchskörper aus Faserbeton die Stahlspannung im Riß zu $\sigma_{SR} = N/A_s$ gesetzt werden, obgleich bekannt ist, daß infolge Mitwirkung der Fasern die tatsächlichen Stahlspannungen niedriger sind. Bezüglich der Stahldehnung im Rißquerschnitt gilt das gleiche. Die mittlere Dehnung läßt sich wie folgt anschreiben:

$$\epsilon_m = \epsilon_{SR} - \Delta\epsilon \quad (1)$$

Voraussetzend, daß die Mitwirkung bei der Erstrißlast am größten ist und daß sie mit der Höhe der Belastung stetig abnimmt, gibt Rao [4] folgende Beziehung für die mittlere Dehnung an:

$$\epsilon_m = \epsilon_{SR} - K \cdot \frac{\beta_{bZ}}{\mu E_s} \frac{\sigma_{SR}^1}{\sigma_{SR}} \quad (2)$$

Den Faktor K bestimmt Rao aus Versuchsergebnissen für den Fall der reinen Biegebeanspruchung zu 0,18. Rostásy [5] leitet für den zentrischen Zug eine sehr ähnliche Beziehung ab und bestimmt dabei den Faktor K zu 1,0.

$$\epsilon_m = \epsilon_{SR} - \frac{\beta_{bZ}^2}{\mu^2} \cdot \frac{1 + n\mu}{E_s \cdot \sigma_{SR}} \quad (3)$$

In der CEB/FIP-Mustervorschrift 1978 [6] findet sich ein vergleichbarer Ausdruck für ϵ_m :

$$\epsilon_m = \epsilon_{SR} \left[1 - \left(\frac{\sigma_{SR}^1}{\sigma_{SR}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Falkner [7] führt zur Beschreibung der Mitwirkung einen Faktor k_4 ein.

$$\epsilon_m = \epsilon_{SR} - \frac{k_4^2}{\mu^2} \cdot \frac{1}{\sigma_{SR} \cdot E_s} \quad (5)$$

Der zweite Term auf der rechten Seite der Glg. (5) entspricht dem Abstand $\Delta \epsilon$ der oberen Hüllkurve der treppenstufenartigen $N-\epsilon_m$ -Linie von der Stahlkennlinie. Der Faktor k_4 läßt sich somit aus dem gemessenen $N-\epsilon_m$ -Verlauf folgendermaßen ableiten:

$$k_4 = \mu \cdot \sqrt{\Delta \epsilon^{\text{Vers}} E_s \sigma_{sR}} \quad (6)$$

Eine weitere Möglichkeit, k_4 aus Versuchsergebnissen zu bestimmen, erhält man, wenn man die für das abgeschlossene Rißbild gültige Beziehung

$$w_m = s_{rm,e} \epsilon_m \quad (7)$$

benutzt, d.h., die mittlere Rißbreite w_m sich aus dem Produkt von ϵ_m und dem mittleren Endrißabstand $s_{rm,e}$ errechnen läßt.

$$k_4 = \mu \cdot \sigma_{sR} \sqrt{1 - \frac{w_m^{\text{Vers.}} E_s}{s_{rm,e} \sigma_{sR}}} \quad (8)$$

Die Ableitung des Faktors k_4 entsprechend Glg. (8) ermöglicht es, die obere Hüllkurve auch dann zu bestimmen, wenn man lediglich die Dehnwerte nach dem Dehnungssprung bzw. nach dem Lastabfall versuchsmäßig bestimmen konnte. In diesem Zusammenhang sei nochmals darauf hingewiesen, daß hierfür die Gültigkeit des in Abb. 6.1 dargestellten "Stoffgesetzes" des Stahlbetonzugstabes vorausgesetzt wird. Rostásy und Alda [8] haben bereits die Empfindlichkeit der Bestimmung von k_4 gemäß Glg. 8 aufgezeigt. Bei der Auswertung der eigenen Versuchsergebnisse entsprechend Glg. 8 ergaben sich für einige Fälle negative Ausdrücke für den Term unter der Wurzel. Deshalb wurde entsprechend [8] der Mitwirkungsfaktor k_4 unmittelbar aus der Normalkraft-Dehnungsbeziehung nach Glg. (6) bestimmt.

Die Werte für k_4 und die hieraus errechnete mittleren Dehnungen $\epsilon_m^{k_4}$ sind in den Tab. 6.6 bis 6.10 angegeben. In diesen Tabellen befinden sich auch die rechnerischen mittleren Dehnungen, die mit

dem Näherungsansatz von Rao errechnet wurden. Die sich hieraus ergebenden Kurververläufe sind in den Abb. 6.17 bis 6.21 eingezeichnet.

Für die beiden Versuchskörper ohne Faserbeton (ZK 10/0 und ZK 20/0) liefern die rechnerischen Kurven eine brauchbare Näherung für das Normalkraft-Dehnungsverhalten. Beim ZK 10/0 liegen die Kurven sehr eng beieinander, beim ZK 20/0 hingegen ist der Abstand der rechnerischen $N-\epsilon_m$ -Linien voneinander etwas größer. Hier wird die Dehnung für den Bereich der anfänglichen Ribbildung besser durch die $\epsilon_m^{k_4}$ -Kurve beschrieben. Insgesamt betrachtet, ergeben die $\epsilon_m^{k_4}$ -Kurven eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchskurven. Dies ist i.w. darin begründet, daß zur Herleitung der rechnerischen k_4 -Linie mehrere Versuchswerte herangezogen worden sind, bei der Rao-Kurve wurde lediglich die Erstribstahlspannung als einziger Versuchswert verwendet.

Bei den Zugkörpern mit Faserbeton (ZK 10/1,5; ZK 20/1,5; ZK 28/1,5) werden die Versuchskurven nicht so gut durch die rechnerischen $N-\epsilon_m$ -Linien approximiert. Auch in diesen Fällen ergibt der Ansatz mit k_4 die bessere Annäherung. Bei beiden rechnerischen Lösungen werden erwartungsgemäß die Dehnzustände für höhere Beanspruchungszustände weniger zutreffend beschrieben, d.h., die rechnerischen Dehnungen übersteigen deutlich die tatsächlich gemessenen Verformungen. Beim Versuchskörper ZK 10/1,5 wurden derartige Abweichungen nicht gemessen. Jedoch muß erwähnt werden, daß bereits bei einer mittleren Beanspruchung die Betonierfuge aufgerissen war (s. Abb. 6.23), so daß sich der mittlere Querschnittsteil nicht mehr an der Tragwirkung beteiligte.

Ursache für die geringeren Dehnungen bei den Faserbetonzugkörpern ist, daß infolge der ribüberbrückenden Tragwirkung der Stahlfasern sowohl die Stahlspannung im Ribquerschnitt reduziert wird, als auch der Beton auf ganzer Länge zumindest mit einer Restzugspannung mitträgt. Die Größe der Restzugspannungen des Stahlfa-

serbetons ist für einen Dehnzustand bestimmt worden, bei dem die Bewehrung der Versuchskörper bereits die Streckgrenze erreicht hatte (Tab. 6.11). Insgesamt führt dies zu einer erheblichen Steigerung der Dehnsteifigkeit, insbesondere für die Beanspruchungsbereiche, bei denen durch weitgehenden Verlust des Verbundes zwischen Beton und Bewehrungsstahl kaum noch eine Mitwirkung des Betons vorhanden war.

6.2 Rißbildung

6.2.1 Rißbilder

In den Abb. 6.22 bis 6.26 sind die Rißbilder der Versuchskörper für vier ausgewählte Laststufen dargestellt. Das Rißbild der jeweils ersten Laststufe vermittelt einen Eindruck von der Anzahl und vom Verlauf der Risse bei einer relativ niedrigen Beanspruchung. Aus den Rißbildern der beiden folgenden Laststufen ist die Rißausbildung bei weiterer Ausprägung ersichtlich. Das vierte Bild stellt das abgeschlossene Rißbild dar.

Die Risse verlaufen im Bereich der Bewehrung normal zur Beanspruchungsrichtung. Im Mittenbereich weisen die Risse i.d.R. einen zu den wenigen Trennrissen hin geneigten Verlauf auf. In diesen etwa vier bis sechs Trennrissen summieren sich die Rißbreiten der Risse im Randbereich.

Bei den Versuchskörpern ZK 10/1,5 und ZK 20/1,5 traten auch in Versuchskörperlängsrichtung verlaufende Risse auf. Ursache hierfür war ein Verbundversagen in der Betonierfuge. Bei den Zugkörpern ZK 20/0 und ZK 28/1,5 entstanden Längsrisse bei hohen Stahlspannungen infolge Verbundsprengwirkung.

6.2.2 Rißabstand s_{rm}

Die Entwicklung des mittleren Rißabstandes s_{rm} in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad $(\sigma_{SR} - \sigma_{SR}^1)/\sigma_{SR}$ ist aus den Abb. 6.27 bis 6.31 bzw. aus den Tab. 6.1 bis 6.5 ersichtlich. Es wurden zu ei-

ner gemeinsamen Betrachtung jeweils jene Meßlinien zusammengefaßt, bei denen etwa die gleiche Betondeckung vorlag. Es wird demzufolge i.d.R. zwischen dem Mittenbereich (Meßlinien 3, 4, 8 und 9) und dem Randbereich (Meßlinien 1, 2, 5, 6, 7 und 10) unterschieden.

Hinsichtlich der Erstrißbildung unterschieden sich die Versuchskörper mit Faserbeton deutlich von den Normalbetonversuchskörpern. Während bei den Normalbetonkörpern die den unbewehrten Mittenbereich durchtrennenden Risse sich in den Randbereich hinein fortsetzen und sich dort verzweigten, konnten häufig bei den Faserbetonkörpern im Erstrißstadium noch keine Risse beobachtet werden. Besonders augenfällig tritt dieses Phänomen bei den Zugkörpern ZK 10/0 und ZK 10/1,5 (s. Abb. 6.22 a und 6.23 a) hervor. In diesem Zusammenhang muß erwähnt werden, daß ein Riß als solcher erfaßt wurde, wenn er eine der vorgegebenen Meßlinien kreuzte und etwa eine Rißbreite von 0,02 mm besaß. Risse mit geringerer Breite konnten mit dem bloßen Auge nicht dedektiert werden.

Mit zunehmender Beanspruchung verringern sich die Rißabstände, bis schließlich der für das stabilisierte Rißbild charakteristische Endrißabstand $s_{rm,e}$ erreicht wird. Bei dem Normalbetonzugkörper ist die Rißbildung bei einem Beanspruchungsgrad von 0,2 - 0,3 bereits weitgehend abgeschlossen, während bei dem Versuchskörper mit Faserbeton sich das endgültige Rißbild deutlich später, einem Beanspruchungsgrad von etwa 0,4 - 0,5 entsprechend, einstellte.

Die Abb. 6.32 und 6.33 vermitteln einen Eindruck vom Einfluß einer schwingenden Beanspruchung auf die Rißbildung. Sowohl die fünfzig Lastwechsel mit der großen Belastungsamplitude ($\Delta N = 231$ kN) als auch die 10^5 Lastwechsel mit einer Amplitude von $\Delta N = 77$ kN bewirkten i.d.R. keine einschneidenden Veränderungen des Rißbildes. Einzig bei ZK 10/1,5 war ein deutliches Anwachsen der Rißanzahl zu beobachten. Dies mag daran liegen, daß

bei diesem Versuchskörper nicht schon, wie bei den übrigen, das stabilisierte Rißbild bei Erreichen der Oberlast vorhanden war.

Ein Vergleich der gemessenen Endrißabstände mit rechnerischen Werten soll im folgenden für die Normalbetonzugkörper ZK 10/0 und ZK 20/0 angestellt werden. Ausgehend von der Überlegung, daß ein Riß erst dann auftreten kann, wenn die vom Bewehrungsstahl mittels Verbund an den Beton übertragenden Zugkräfte ein Übersteigen der Betonzugfestigkeit verursachen, läßt sich für den kleinsten Rißabstand die folgende Beziehung anschreiben:

$$s_{rm,e} = \frac{\beta_{bZ}}{\tau_{vm}} \cdot \frac{A_{bZ}}{\Sigma U}; \quad (9)$$

Der erste Quotient auf der rechten Seite der Glg. (9) gibt das Verhältnis der Betonzugfestigkeit zur Verbundfestigkeit an. Der zweite Quotient stellt das Verhältnis der Betonzugzone zur Umfangsfläche der Bewehrung dar. In abgewandelter Form lautet die Glg. (9)

$$s_{rm,e} = k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{d_s}{\mu_s} \quad (10)$$

Im Versuch hat man jedoch festgestellt, daß ein von der Betondeckung abhängiger Rißabstand nicht unterschritten werden kann. Rehm/Martin [9] haben die Glg. (10) um einen Term erweitert und geben den Endrißabstand an zu:

$$s_{rm,e} = k_1 \cdot c_b + k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{d_s}{\mu_s} \quad (11)$$

Die mit der Betondehnung c_b zu multiplizierende Konstante wird von ihnen mit 1,5 angegeben. Der die Verbundgüte des Bewehrungsstahles beschreibende Faktor k_2 läßt sich nach Rehm/Martin zu

$$k_2 = \frac{0,9}{0,2 + f_R^{2/3}} \quad (12)$$

berechnen. Die Verbundbeiwerte für die in den Versuchen verwendeten Betonstähle sind in der Tab. 6.12 aufgeführt. Für eine Berechnung des Endrißabstandes von gezogenen Stahlbetonstäben geben o.g. Autoren k , mit 5,0 an.

In der CEB/FIP Mustervorschrift von 1978 [6] wird eine vom prinzipiellen Aufbau ähnliche Formel angegeben. Hier wird der erste Term der Glg. (11) dadurch erweitert, daß neben der Betondeckung auch dem Abstand s zwischen den einzelnen Bewehrungsstäben Einfluß auf den Endrißabstand zugebilligt wird.

$$s_{rm,e} = 2 \left(c_b + \frac{s}{10} \right) + x_1 \cdot x_2 \cdot \frac{d_s}{\mu} \quad (13)$$

Die Faktoren x_1 und x_2 sind Beiwerte, durch die Einflüsse der Verbundgüte und der Beanspruchungsart berücksichtigt werden. Ihr Produkt beträgt für gerippte Betonstähle und bei zentrischem Zug 0,1.

Mit den Glg. (11) und (13) können Endrißabstände gleichmäßig mit Bewehrung durchgesetzter Stahlbetonbauteile berechnet werden. Sollten jedoch Endrißabstände von Traggliedern bestimmt werden, bei denen die Bewehrung konzentriert an den Randbereichen angeordnet ist - dieses trifft auf die untersuchten Zugkörper zu - so ist der Bewehrungsgrad für die effektive Betonzugzone zu berechnen. Eine Formel zur Berechnung der effektiven Betonzugzone wird in der CEB-Mustervorschrift angegeben.

In der Tab. 6.12 sind die rechnerischen Endrißabstände nach Rehm/Martin und CEB 78 den gemessenen Werten gegenübergestellt. Bei der Ermittlung der gemessenen Endrißabstände wurden nur diejenigen Risse berücksichtigt, die die effektive Betonzugzone vollständig durchtrennt haben. Diese Vereinbarung ist zu treffen, da durch die verwendeten Formeln nur derartige Risse erfaßt werden, nicht jedoch Einrisse von nur geringer Länge. Hieraus re-

sultieren Endrißabstände, die teilweise deutlich größer sind als diejenigen, die in den Tab. 6.1 bis 6.5 angegeben werden.

Ein Vergleich der rechnerischen Werte untereinander zeigt, daß sie die Endrißabstände nach beiden Formeln in etwa gleicher Größe ergeben. Lediglich die Bewertung des Einflusses der Betondeckung führt zu geringen Unterschieden. Die Übereinstimmung der rechnerischen Endrißabstände mit den gemessenen kann für die Versuchskörper ZK 10/0 als sehr gut bezeichnet werden, beim ZK 20/0 ist der gemessene Wert jedoch deutlich kleiner. Die Abweichung kann z.B. durch die geringe Betonzugfestigkeit oder auch durch Eigenspannungen infolge Schwinden ($W/Z = 0,7$) verursacht worden sein. Denkbar sind auch Einflüsse aus langzeitiger Belastung.

Der Vollständigkeit halber sind auch die Endrißabstände der Zugkörper mit Faserbeton den rechnerischen Werten in der Tab. 6.12 gegenübergestellt. Ein Vergleich ist nur begrenzt möglich, da eine ausgeprägte Trennrißbildung, wie sie bei Anwendung der Formeln vorausgesetzt wird, nicht in allen Fällen vorliegt. Besonders beim Zugkörper ZK 10/1,5 fehlt eine Trennrißbildung (s. Abb. 6.23) fast völlig.

6.2.3 Rißbreiten

Die mittleren Rißbreiten w_m sind neben den maximalen Rißbreiten w_{max} und den kritischen Rißbreiten in den Tab. 6.1 bis 6.5 angegeben. Die Abb. 6.34 bis 6.38 zeigen den Verlauf der mittleren Rißbreiten im Randbereich und im Mittenbereich sowie der kritischen Rißbreiten im Randbereich in Abhängigkeit von der mittleren Dehnung ϵ_m . Maßgebend ist hier die Dehnung, bei der die Rißbreitenmessung durchgeführt worden ist, also diejenige unmittelbar vor der Laststeigerung einschl. aller Dehnungsanteile aus langzeitiger Belastung.

Aus dem Anstieg der w_m - ϵ_m -Linien für die Meßlinien im Randbereich läßt sich direkt ableiten, welche Wirksamkeit die jeweilige Be-

wehrungsform bezügl. Rißverteilung besitzt. Dieses gilt jedoch uneingeschränkt nur für die Versuchskörper ohne Stählfaserbeton (ZK 10/0 und ZK 20/0). Die hinsichtlich der Rißbildung vorteilhafte Anordnung vieler Bewehrungsstäbe mit kleinen Durchmessern (ZK10/0) anstelle weniger Stäbe mit größeren Durchmessern (ZK 20/0) drückt sich in einer über alle Beanspruchungsbereiche nur etwa halb so großen mittleren Rißbreite im Randbereich aus. Einflüsse auf das Rißverhalten in bewehrungsfernen Bereichen sind aus den Ergebnissen der Rißbreitenmessung im Mittenbereich nicht zu erkennen, denn für gleiche Dehnzustände wurden annähernd gleiche mittlere Rißbreiten gemessen.

Die Versuchskörper mit Faserbeton weisen bei gleicher mittlerer Dehnung immer geringere mittlere Rißbreiten als die Vergleichskörper ohne Fasern auf. Einen Einfluß auf die Rißbildung im Mittenbereich durch die Faserbewehrung konnte auch bei diesen Versuchskörpern nicht nachgewiesen werden. Die sehr großen Rißbreiten im Mittenbereich beim ZK 10/1,5 sind durch das Aufreißen der Betonierfuge zwischen Faserbeton und Normalbeton zu erklären.

Zur Beurteilung des Korrosionsschutzes der Bewehrung ist nicht nur die mittlere Rißbreite maßgebend. Es ist vielmehr wichtig, die maximale oder eine kritische Rißbreite auf ein vorgegebenes Maß zu beschränken. Als kritische Rißbreite wird häufig jene gewählt, die von nur 5 % aller gemessenen Rißbreiten überschritten wird. Aus den Histogrammen in den Abbildungen 6.39 bis 6.43 ist für jeden Versuchskörper die Häufigkeitsverteilung der Rißbreiten auf bestimmten Meßlinien bei der höchsten Laststufe zu entnehmen. Die kritische Rißbreite w_{95} ist als 95 %-Fraktilenwert in den Histogrammen eingezeichnet. Sie errechnet sich aus der mittleren Rißbreite w_m plus der Standardabweichung s der Rißbreitenverteilung, multipliziert mit einem Faktor k' .

$$w_{95} = w_m + k' \cdot s \quad (14)$$

Der Faktor k' ist bei Vorgabe einer Irrtumswahrscheinlichkeit, eines Fraktilenwertes und in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe z.B. der Tabelle C 6 in [10] zu entnehmen.

Die Größe der kritischen Rißbreite w_{95} im Randbereich bzw. auf dem Meßlinienpaar 1, 6 (ZK 28/1,5) ist in Abhängigkeit von der mittleren Dehnung für alle Versuchskörper in den Abb. 6.34 bis 6.38 dargestellt. Das Verhältnis w_{95}/w_m wurde im Mittel über alle Laststufen und alle Versuchskörper zu 2,218 bestimmt. Bei allen Versuchskörpern werden für die unteren und für die höchsten Laststufen relativ höhere Werte ermittelt als für mittlere Beanspruchungszustände. Ebenso wurde ein gleichzeitiges Anwachsen des Verhältniswertes mit dem Verhältnis d_s/μ_{eff} festgestellt (s. Tab. 6.13). Ein Unterschied in der Streuung der Rißbreiten um w_m konnte zwischen Faserbeton- und Normalbetonkörpern nicht beobachtet werden.

In den Abb. 6.44 bis 6.48 ist der Zusammenhang zwischen der gemessenen mittleren Rißbreite und der Stahlspannung σ_{SR} dargestellt.

Die Rißbreite resultiert aus der Relativverschiebung v zwischen Stahl und Beton im Riß. Bei geringer Beanspruchung - also bei nichtausgeprägtem Rißbild - existieren zwischen den einzelnen Rissen noch Bereiche unverschieblichen Verbundes ($v = 0$). Allgemein läßt sich die mittlere Rißbreite als Verschiebungsdifferenz entlang der mittleren Einleitungslänge l_{Em} anschreiben:

$$w_m = 2 \int_0^{l_{Em}} [\epsilon_s(x) - \epsilon_b(x)] dx \quad (15)$$

Vernachlässigt man die ohnehin nur sehr geringen Betondehnungen, so kann man w_m vereinfacht darstellen.

$$w_m = 2 l_{Em} \bar{\epsilon}_{sm} \quad (16)$$

Die Dehnung $\bar{\epsilon}_{sm}$ ist die mittlere Stahldehnung innerhalb der Einleitungslänge. Bei anfänglicher Rißbildung ist $\bar{\epsilon}_{sm}$ deutlich größer als die mittlere Dehnung ϵ_m über die gesamte Versuchskörperlänge. Erst wenn es keine Bereiche mit unverschieblichem Verbund mehr gibt, geht die Glg. (16) über in

$$w_m = 2 l_{Em} \cdot \epsilon_m \quad (17)$$

Bei ausgeprägtem Rißbild, d.h. der Endrißabstand $s_{rm,e}$ ist erreicht, gilt schließlich

$$w_m = s_{rm,e} \epsilon_m \quad (18)$$

Die CEB/FIP-Mustervorschrift 1978 geht von der der Glg. (18) zugrunde liegenden Vorstellung aus und gibt den Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und der mittleren Rißbreite unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug an zu

$$w_m = s_{rm,e} \epsilon_{sR} \left[1 - \left(\frac{\sigma_{sR}^1}{\sigma_{sR}} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Der Endrißabstand $s_{rm,e}$ ist entspr. der Glg. (13) aus Abschnitt 6.2.2 zu ermitteln. Wird eine Mitwirkung des Betons nicht in Ansatz gebracht, so berechnet man die Rißbreite w_m nach

$$w_m = s_{rm,e} \frac{\sigma_{sR}}{E_s} \quad (20)$$

Die rechnerischen Kurvenverläufe für die mittlere Rißbreite im Randbereich bzw. auf den Meßlinien 1 und 6 (ZK28/1,5) entsprechend der Glgn. (19) und (20) sind in den Abb. 6.44 bis 6.48 eingezeichnet. Es wurde hier anstelle des rechnerischen Endrißabstandes der jeweils aus dem Versuch bestimmte Endrißabstand eingesetzt.

Zwischen den Linien gem. Glg. (19) bzw. (20) müßten in etwa die gemessenen Rißbreiten liegen. Der erwartete Verlauf trifft für

die Versuchskörper ohne Faserbewehrung annähernd zu, wenn man die bei Rißmessungen erzielbaren Genauigkeiten berücksichtigt.

Bei den Versuchskörpern mit Faserbeton überschätzt die Rechnung die mittlere Rißbreite erheblich. Dies gilt besonders für höhere Beanspruchungen, für Bereiche also, für die die Gln. (19) und (20) erst ihre Gültigkeit erlangen.

Zur Klärung dieses Widerspruchs wurde die Summe der Rißbreiten, bezogen auf die Länge der Meßbasis der mittleren Dehnung ϵ_m , in Abhängigkeit von der Belastung in den Abb. 6.49 bis 6.53 gegenübergestellt. Wegen der Beziehung

$$\sum w/l + \epsilon_b = \epsilon_m$$

ist für steigende Beanspruchung eine Annäherung der $\sum w/l$ -Linie an die ϵ_m -Kurve infolge der Verringerung der Mitwirkung des Betons zu erwarten. Dieses Verhalten geben die gemessenen Kurvenverläufe wieder. Dabei ist zu erkennen, daß die Rißbreitensumme umso besser der mittleren Dehnung entspricht, je weiter die betreffende Meßlinie von der Bewehrung entfernt ist. Gleichfalls ist zu beobachten, daß die Übereinstimmung von $\sum w/l$ mit ϵ_m im Randbereich bei den Versuchskörpern mit relativ großer mittlerer Rißbreite besser ist als bei jenen Versuchskörpern, deren mittlere Rißbreite geringer ausfällt.

Diese Diskrepanz kann nur so erklärt werden, daß neben den visuell entdeckbaren Rissen ($w \geq 0,02$ mm) sich eine Vielzahl sehr schmaler Risse gebildet haben müssen, die mit dem bloßen Auge nicht mehr wahrnehmbar sind. Offenbar ist diese Mikrorißbildung umso ausgeprägter, je wirksamer eine Bewehrungsanordnung bezüglich der Rißverteilung ist, d.h., je niedriger das Rißbreitenniveau liegt (vgl. ZK 10/0 und ZK 20/0). Die Mikrorißbildung tritt bei den faserbewehrten Versuchskörpern verstärkt in Erscheinung. Beim Zugkörper ZK 10/1,5 beispielsweise konnten auf den Meßlinien

im Randbereich visuell keine Risse ausgemacht werden, obwohl die Messungen mit dem Setzdehnungsmesser eine Rißbildung anzeigten. Die Abb. 6.54 macht deutlich, wie groß die Verformungsanteile aus Mikrorißbildung und Betondehnung in Abhängigkeit von der Belastung sind. Selbst bei der höchsten Laststufe, bei der kaum eine Mitwirkung des Betons vorhanden war, entspricht die Rißbreitensumme auf den Meßlinien 1 und 6 nur etwa 75 bis 95 % der mittleren Dehnung, im Sonderfall ZK 10/1,5 sogar nur 25 %.

Bei der Ermittlung der mittleren Rißbreite w_m wird zwischen Rissen, die den gesamten Versuchskörper durchtrennen, und solchen, die nur im Bereich der Bewehrung vorhanden sind, nicht unterschieden. Daß eine gemeinsame Betrachtung aller Risse im Randbereich hinsichtlich der Rißbreite gerechtfertigt ist, soll im folgenden belegt werden. Hierzu wurden erst einmal für alle Versuchskörper die Rißbreiten von zwei sogen. Trennrissen auf allen Meßlinien auf jeweils drei Stahlspannungsniveaus untersucht (Abb. 6.55 bis 6.59). Erwartungsgemäß ist ihre Rißbreite im Mittenbereich - hier sind sie sogen. Sammelrisse - sehr viel größer als am Rand, und zwar unabhängig von der Beanspruchung.

In den Abb. 6.60 bis 6.64 ist dann die mittlere Rißbreite aller Risse w_m^{AR} der mittleren Trennrißbreite w_m^{TR} gegenübergestellt worden. Man erkennt aus der Differenz der beiden Rißbreiten, daß im Mittenbereich die Trennrisse sich erheblich von den übrigen Rissen unterscheiden. Im Randbereich, und hier insbesondere auf den Meßlinien 1 und 6, konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Rißbreite zwischen den Rißtypen Trennriß bzw. Einriß aufgezeigt werden.

Abschließend soll der Einfluß einer schwingenden Belastung auf die Rißbreite behandelt werden. Die Messung der Rißbreiten erfolgte im Randbereich auf den Meßlinien 2, 5, 7 und 10. Abb. 6.65 zeigt die Zunahme der bezogenen Rißbreitensumme $\Sigma w/l$ mit wachsender Lastwechselzahl. Ausgehend von erheblich unterschiedlichen Rißbreitensummen ist der Anstieg der Summe der Rißbreiten für

alle Versuchskörper - unabhängig von Bewehrungsform und Fasergehalt - annähernd gleich groß.

Die Analyse der Verlaufes der mittleren Rißbreite w_m ergibt, daß eine schwellende Zuglast nicht in jedem Fall einen Anwachsen von w_m zur Folge hat (Abb. 6.66 bis 6.70). Es wurde zwar einheitlich eine Zunahme der Rißbreitensumme und auch der Breite einzelner Risse beobachtet, jedoch blieb die mittlere Rißbreite infolge der Bildung neuer Risse (s. Abschn. 6.2.2) weitgehend konstant. Die Differenz zwischen der mittleren Rißbreite bei Oberlast und der bei Unterlast bleibt durch eine dynamische Belastung nahezu unverändert. Lediglich für die ersten fünfzig Lastspiele mit der großen Spannungsamplitude war ein geringer Anstieg zu verzeichnen.

Für eine vergleichende Betrachtung des Einflusses von Fasergehalt und Bewehrungsstabdurchmesser auf die Rißbreite sind in der Abb. 6.71 die mittleren Rißbreiten w_m im Randbereich aller Versuchskörper, in Abhängigkeit von der Beanspruchung, aufgetragen worden. Beim Versuchskörper ZK 28/1,5 wurde eine Unterscheidung von w_m sowohl für die Meßlinien mit der großen Betondeckung von $c_b = 8,6$ cm (ML 2, 3, 7 und 10) als auch für jene mit einer Betondeckung von $c_b = 3,6$ cm (ML 1 und 6) getroffen.

Aus der Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse ist ein deutlicher Einfluß des Bewehrungsstabdurchmessers auf die mittlere Rißbreite ersichtlich. Für eine Stahlspannung von $N/A_s = 240$ N/mm², entsprechend etwa dem Gebrauchsspannungsbereich, weist der Zugkörper ZK 20/0 ($d_s = 20$ mm, $\mu_f = 0$) etwa eine doppelt so große mittlere Rißbreite auf wie der vergleichbare Zugkörper mit den Stabdurchmessern 10.

Durch eine zusätzliche Stahlfaserarmierung werden die Rißbreiten in jedem Fall reduziert. Die Größe der Verringerung ist umso ausgeprägter, je größer der Stabdurchmesser ist. So wird bei ei-

nem Stabdurchmesser von 10 mm die mittlere Rißbreite nur unwesentlich verkleinert. Hierbei ist allerdings anzurügen, daß bereits die Rißbreiten des Normalbeton-Versuchskörpers ohnehin mit $\approx 0,12$ mm gering waren. Beim ZK 10/1,5 wurde weniger die mittlere Rißbreite reduziert, als daß die Summe der Breiten aller dedektierten Risse auf ca. die Hälfte verringert wurde (s. Abb. 6.50 und 6.51)

Bei den Versuchskörpern mit $d_s = 20$ mm wird durch die Stahlfasern die mittlere Rißbreite auf ca. die Hälfte reduziert. Es ergeben sich damit für den interessierenden Bereich der Beanspruchung $N/A_s \leq 240$ N/mm² gleiche mittlere Rißbreiten wie bei den Zugkörpern aus Normalbeton mit dem Bewehrungsstabdurchmesser von 10 mm.

Das Rißverhalten des Zugkörpers ZK 28/1,5 ($d_s = 28$ mm, $\mu_f = 1,50$ Vol.%) wird für zwei Meßlinienpaarungen getrennt betrachtet. Bei einer Betondeckung von $C_b = 3,6$ cm (ML 1 und 6) wird in etwa die gleiche mittlere Rißbreite wie beim ZK 20/1,5 ($C_b = 4,0$ cm) gemessen. Die mittlere Rißbreite auf den Meßlinien 2, 5, 7 und 10 ($C_b = 8,6$ cm) erreicht i.M. in etwa die 4-fache Größe. Hieraus wäre abzuleiten, daß bei einem Bewehrungsgehalt $\mu_s = 1,0$ % der Einfluß des Bewehrungsstabdurchmessers auf die mittlere Rißbreite für $d_s > 20$ mm dem Einfluß der Betondeckung untergeordnet ist. Wie die Rißbilder in Abb. 6.26 zeigen, treten auf den Meßlinien mit der kleineren Betondeckung eine Vielzahl von Zwischenrissen auf, deren Länge kleiner als die Breite der Schmalseiten der Versuchskörper ist und somit die Betonoberfläche an den Breitseiten nicht mehr erreichen.

Man muß also feststellen, daß die Stahlfasern nicht in der Lage sind, bei großer Betondeckung die Rißbreite wesentlich zu vermindern. Abb. 6.64 zeigt kaum Unterschiede in der Rißbreite zwischen den Meßlinien 2, 5, 7 und 10 (Faserbeton) und Meßlinien 3, 4, 8 und 9 (Normalbeton).

6.3 Dehnsteifigkeit

Im ungerissenen Zustand besitzt der Stahlbetondehnkörper eine Dehnsteifigkeit:

$$K_{Di} = E_b A_i = E_s A_s \frac{1 + n\mu}{n\mu} \quad (21)$$

Mit zunehmender Rißbildung verringert sich die Dehnsteifigkeit. Sie errechnet sich aus:

$$K_D = N/\epsilon_m \quad (22)$$

Auf die Ausgangssteifigkeit im Zustand I bezogen, kann sie dargestellt werden als:

$$K_D = K_D/K_{Di} \quad (23)$$

Mit fortschreitender Rißbildung nähert sich die Dehnsteifigkeit dem Grenzwert:

$$K_{Ds} = E_s A_s/K_{Di} \quad (\text{reiner Zustand II}) \quad (24)$$

Die für die Versuchskörper gemessenen Dehnsteifigkeiten sind in den Tab. 6.14 bis 6.18 angegeben. Den gemessenen Werten sind rechnerische nach einem Ansatz gem. der CEB/FIP-Mustervorschrift 1978 gegenübergestellt.

$$\text{rechn. } K_D = \frac{\sigma_{sr} A_s}{\epsilon_{sR} \left[1 - \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{sR}} \right)^2 \right]} \cdot \frac{1}{K_{Di}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{sR}} \right)^2} \cdot \frac{n \cdot \mu}{1 + n\mu} \quad (25)$$

Der Verlauf der Dehnsteifigkeit des Versuchskörpers entsprechend Glg. (25) in Abhängigkeit von der bezogenen Normalkraft N/A_s ist in den Abb. 6.72 bis 6.76 dargestellt. Die gemessenen Dehnsteifigkeiten sind als Punkte in den Abbildungen eingezeichnet.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Stahlbetonbauteile weisen häufig bereits unter Gebrauchslast Risse infolge Last und/oder Zwang auf. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Korrosionsschutzes fordern die Vorschriften eine Beschränkung der Rißbreite. Hierdurch ergeben sich in ungünstigen Fällen große Bewehrungsmengen bzw. unwirtschaftliche, kleine Stabdurchmesser.

In einer früheren Forschungsarbeit [1] konnte aufgezeigt werden, daß die Reißbreite in Stahlbetonzugstäben durch eine zusätzliche Faserbewehrung in Abhängigkeit vom Fasergehalt und dem Bewehrungsgrad um bis zu 50 % reduziert werden kann.

Ziel dieser Forschungsarbeit war es, die Verringerung der Rißbreite an Versuchskörpern mit praxisnahen Abmessungen quantitativ zu bestimmen. Hierzu wurden fünf Zugversuche an Stahlbetonscheiben ($b/d/l$ 20/63/350 cm) durchgeführt. Sie wurden mit Rippenstäben von 10, 20 und 28 mm Durchmesser und mit dem festen Bewehrungsgrad von $\mu_s = 1 \%$ bewehrt. Die Bewehrung war beidseitig an den Schmalseiten des Querschnitts angeordnet. Bei drei Versuchskörpern wurde der unmittelbar den Bewehrungsstahl umgebende Bereich in Faserbeton hergestellt, der übrige Bereich bestand aus Normalbeton ohne Stahlfasern. Bei zwei Vergleichskörpern wurde nur Normalbeton verwendet. Es wurde das Riß- und Dehnverhalten unter statischer und dynamischer Belastung untersucht.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Für die Höhe der Erstrißlast ist die Zugfestigkeit des Normalbetons im unbewehrten Mittenbereich (MB) der Versuchskörperquerschnitte bestimmend. Die ersten Risse traten jeweils dort auf und pflanzten sich bei den Versuchskörpern ohne Stahlfasern in die mit Bewehrung durchsetzten Randbereiche (RB) mit verminderter

Rißbreite fort. Bei den Faserbetonkörpern waren die Risse im RB deutlich schmaler, bzw. es war bei anfänglicher Rißbildung eine Rißbildung mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen.

2. Beim Übergang in den Zustand II wurden bei den Normalbetonkörpern beträchtliche Steifigkeitsverluste gemessen; die Abnahme der Dehnsteifigkeit verlief bei den Faserbetonkörpern weniger abrupt.

3. Die Fließlast der Versuchskörper erhöhte sich durch die Stahlfaserbewehrung - ca. 30 % der gesamten Querschnitte bestand aus Faserbeton mit einem Fasergehalt von 1,50 Vol.-% - um rd. 9 %.

4. Durch eine zusätzliche Faserbewehrung wird die Ausbildung des Endrißabstandes $s_{rm,e}$ zu größeren Beanspruchungszuständen hin verzögert. Die gemessenen Endrißabstände im Randbereich waren für die Faserbetonzugkörper gleich oder größer als diejenigen der Normalbetonkörper. Aus der Tatsache, daß die bezogene Rißbreitensumme $\sum w/l$ erheblich kleiner als die mittlere Dehnung ε_m ist - beide Werte müßten in ihrer Größe in etwa übereinstimmen -, läßt sich ableiten, daß bei den Faserbetonkörpern zusätzliche Risse sehr geringer Breite vorhanden gewesen sein müssen, die jedoch mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen waren. Die tatsächliche Anzahl der Risse im RB wird somit, insbesondere bei den Faserbetonkörpern, deutlich über der gemessenen liegen.

Ein direkter Einfluß der Fasern auf die Rißbildung im Mittenbereich konnte nicht aufgezeigt werden.

5. Die mittlere Rißbreite w_m wird für alle Beanspruchungszustände durch Zugabe von Stahlfasern reduziert. Die Verringerung von w_m ist umso ausgeprägter, je größer die mittlere Rißbreite des nichtfaserbewehrten Versuchskörpers ist. So beträgt beispielsweise die Rißbreite im Randbereich bei den Zugkörpern mit Stahlfasern und mit dem Stabstahldurchmesser $d_s = 20$ mm für den Ge-

brauchsspannungszustand ($N/A_S \approx 240 \text{ N/mm}^2$) nur rd. 50 % derjenigen des Vergleichskörpers ohne Fasern.

7. Eine schwellende Beanspruchung, deren Oberlast in etwa der Gebrauchslast entspricht, bewirkt bei den Faserbetonversuchskörpern, ausgehend von einem niedrigeren Dehnungsniveau, eine stärkere Zunahme der mittleren Dehnung ε_m als bei den Versuchskörpern ohne Stahlfasern. Die Anzahl der Risse vergrößert sich geringfügig, der mittlere Rißabstand verringert sich nur wenig. Sowohl die Breite der einzelnen Risse, als auch die Rißbreitensumme $\sum w/l$ steigt stetig mit der Lastwechselzahl an, die mittlere Rißbreite w_m bleibt - wegen der Bildung neuer Risse - jedoch nahezu unverändert.

LITERATUR

- [1] Rostásy, F.S. und Hartwich, K.: Rißverhalten von faserbewehrtem Beton mit zusätzlicher schlaffer Bewehrung. Bericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, August 1982
- [2] Körmeling, H.A., Reinhardt, H.W. und Shah, S.P.: Static and dynamic testing of concrete beams with fibres and continuous bars. Report 5-78-10, Stevin Laboratory, TH Delft, März 1979
- [3] Rostásy, F.S.: Baustoffe. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz, 1983
- [4] Rao, P.S.: Die Grundlagen zur Berechnung der bei statisch unbestimmten Stahlbetonkonstruktionen im plastischen Bereich auftretenden Umlagerungen der Schnittkräfte. DAFSt-Forschungsheft Nr. 177, 1966
- [5] Rostásy, F.S.: Zwang und Rissebeschränkung bei Außenwänden aus Stahlleichtbeton. Habilitationsschrift, Stuttgart, 1975
- [6] CEB/FIP-Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton. Bel. II, 3. Ausgabe, 1978
- [7] Falkner, H.: Zur Frage der Rißbildung durch Eigen- und Zwängspannungen infolge Temperatur in Stahlbetonbauteilen. DAFSt-Forschungsheft Nr. 208, 1969
- [8] Rostásy, F.S. und Alda, W.: Rißbildung und Dehnsteifigkeit von Stahlleichtbetonstäben unter zentrischem Zwang. Forschungsbericht des Otto-Graf-Instituts, Stuttgart 1975
- [9] Rehm, G. und Martin, H.: Zur Frage der Rißbegrenzung im Stahlbetonbau. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 8, 1968
- [10] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Bd. 1, 1977

Bezeichnungen:

N Normalkraft
 N^1 Erstrißkraft
 N/A_s bezogene Normalkraft

ϵ Dehnung
 ϵ_m mittlere Dehnung
 ϵ_s Stahldehnung
 ϵ_{sR} Stahldehnung im Riß
 ϵ_b Betondehnung
 $\Delta\epsilon$ Differenzdehnung $\epsilon_{sR} - \epsilon_m$

σ_{sR} Stahlspannung im Riß
 σ_{sR}^1 Erstrißstahlspannung
 τ_{vm} mittlere Verbundspannung

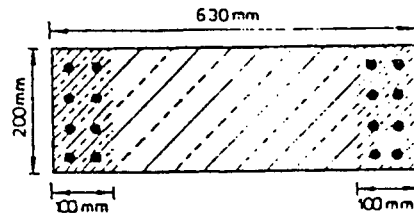
β_{bZ} Betonzugfestigkeit
 β_s Stahlstreckgrenze
 E_s E-Modul des Stahls
 E_b E-Modul des Betons
 E_i ideeller E-Modul des Verbundkörpers (Zustand I)
 n E_s/E_b

A_b Betonquerschnittsfläche
 A_{beff} effektive Betonzugzone
 A_s Stahlquerschnittsfläche
 μ_s, μ A_s/A_b
 μ_{eff} A_s/A_{beff}
 μ_f Fasergehalt in Vol.-%
 c_b Betondeckungsmaß
 s gegenseitiger Bewehrungsstababstand

w	Rißbreite
w_m	mittlere Rißbreite
s_{rm}	mittlerer Rißabstand
$s_{rm,e}$	mittlerer Endrißabstand
l_{Em}	Einleitungslänge

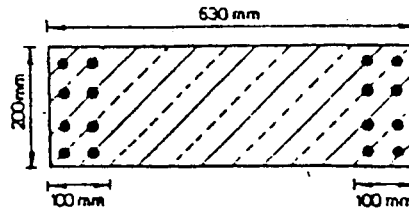
K_D	Dehnsteifigkeit
K_{Di}	ideelle Dehnsteifigkeit (Zustand I)
K_{Ds}	Dehnsteifigkeit der Bewehrung
k_D	bezogene Dehnsteifigkeit K_D/K_{Di}

ZK 10/1,5



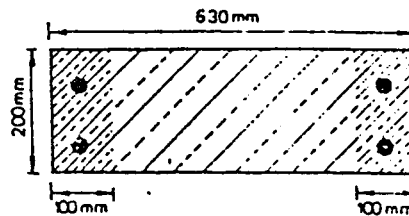
10 ϕ 10 Bst 420/500 RU
 $A_s = 12,816 \text{ cm}^2$
 $\mu_s = 1,02 \%$
 $\mu_t = 1,5 \%$
 Faserart : —

ZK 10/0



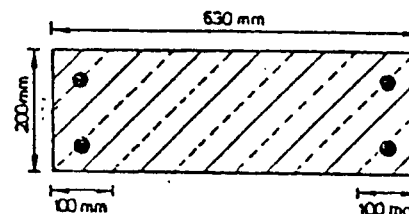
10 ϕ 10 Bst 420/500 RU
 $A_s = 12,816 \text{ cm}^2$
 $\mu_s = 1,02 \%$
 $\mu_t = \div$
 Faserart : +

ZK 20/1,5



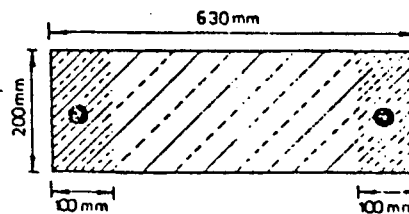
4 ϕ 20 Bst 420/500 RU
 $A_s = 12,556 \text{ cm}^2$
 $\mu_s = 1,00 \%$
 $\mu_t = 1,5 \%$
 Faserart : —

ZK 20/0



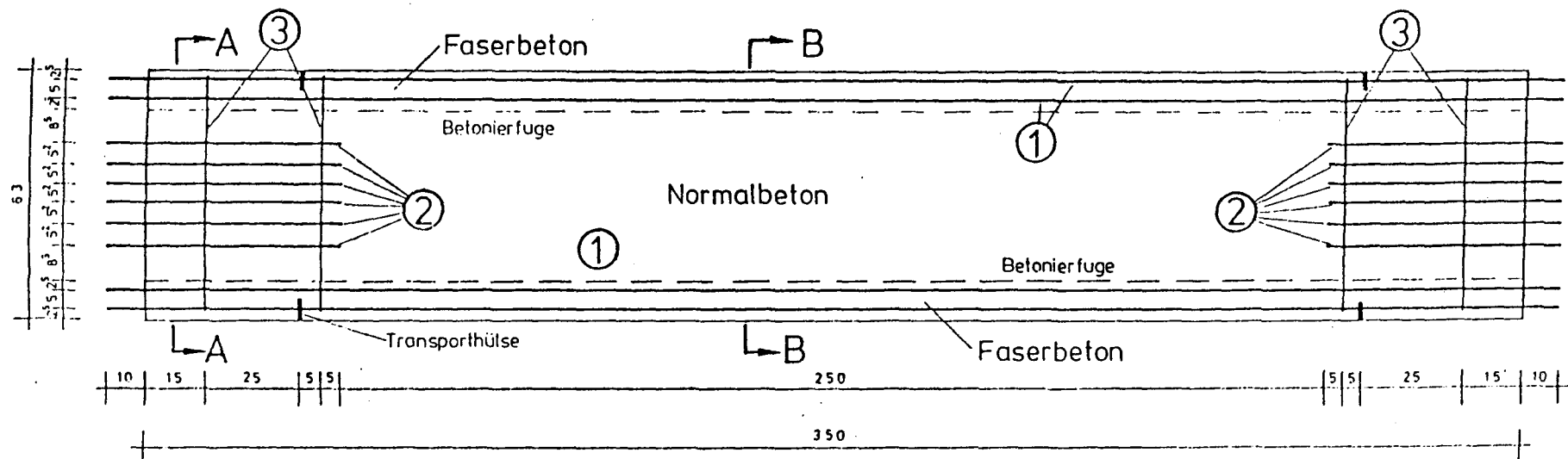
4 ϕ 20 Bst 420/500 RU
 $A_s = 12,556 \text{ cm}^2$
 $\mu_s = 1,00 \%$
 $\mu_t = \div$
 Faserart : +

ZK 28/1,5



2 ϕ 28 Bst 420/500 RU
 $A_s = 12,350 \text{ cm}^2$
 $\mu_s = 0,98 \%$
 $\mu_t = 1,5 \%$
 Faserart : —

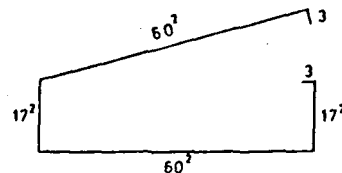
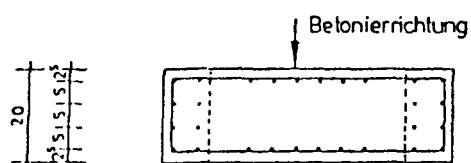
Abbildung 2.1: Übersicht über die Querschnitte



① 16 ϕ 10 mm, $l = 370$ cm - Hauptbewehrung

② 24 ϕ 10 mm, $l = 60$ cm - Einleitungsbewehrung

Schnitt A-A



③ 4 Bü ϕ 6 mm
 $l = 160,8$ cm

Schnitt B-B

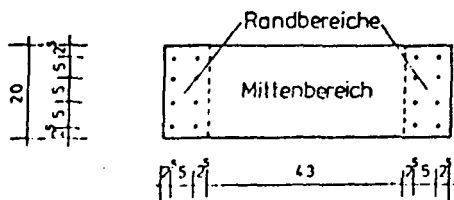


Abbildung 3.1: Bewehrungs- und Schalplan des Versuchskörpers ZK 10/1,5

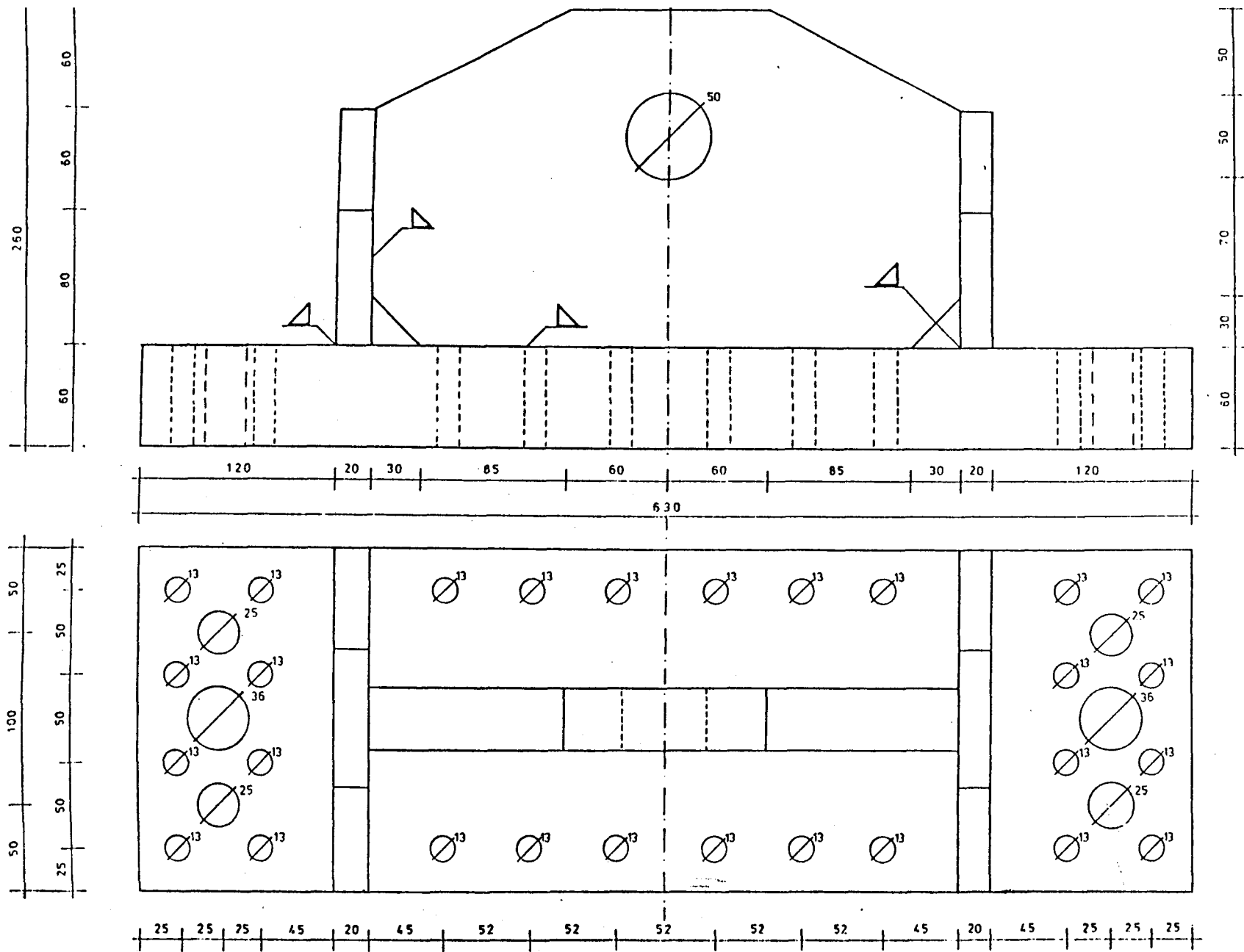


Abbildung 3.2: Kopfplatten

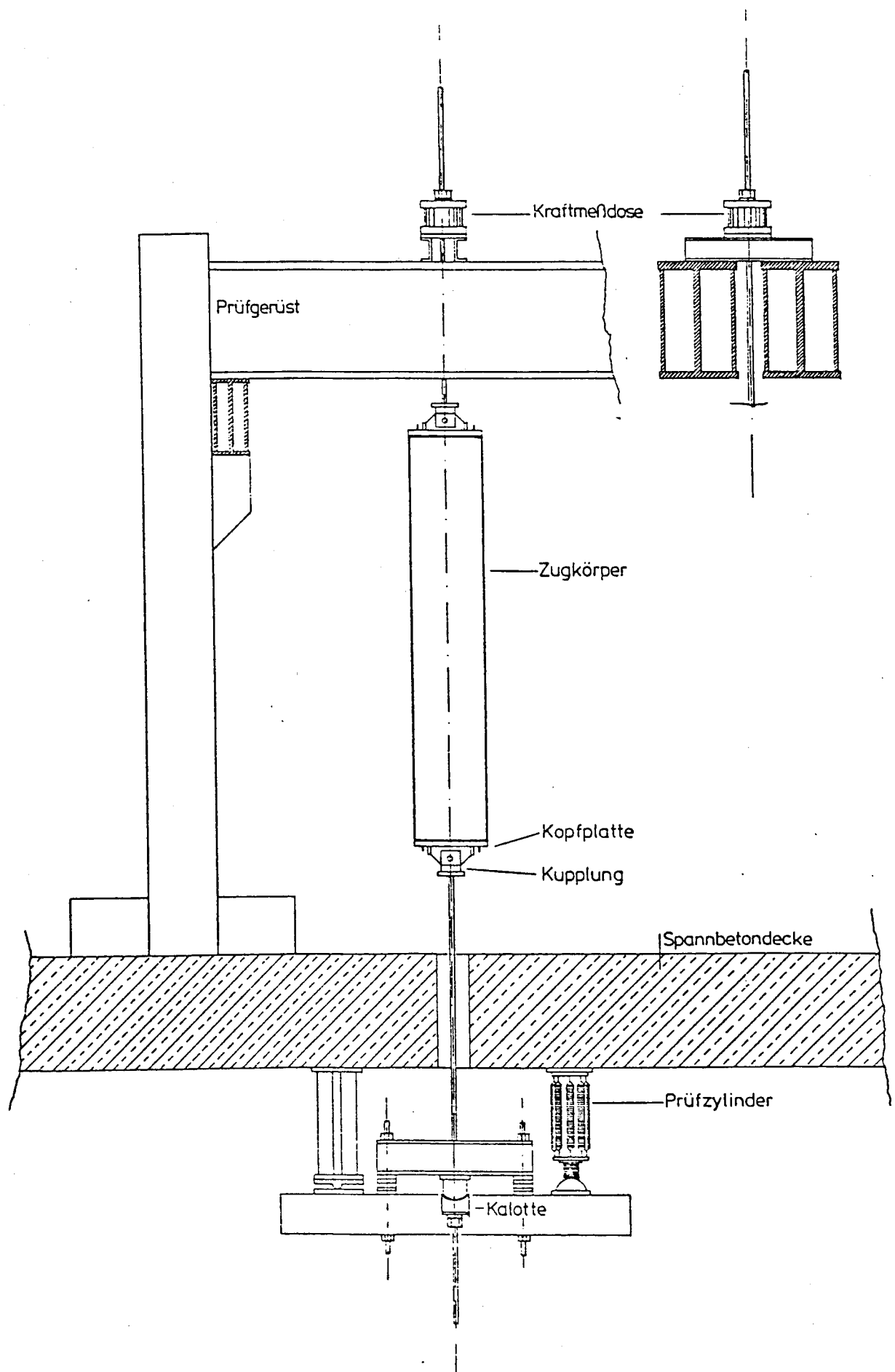
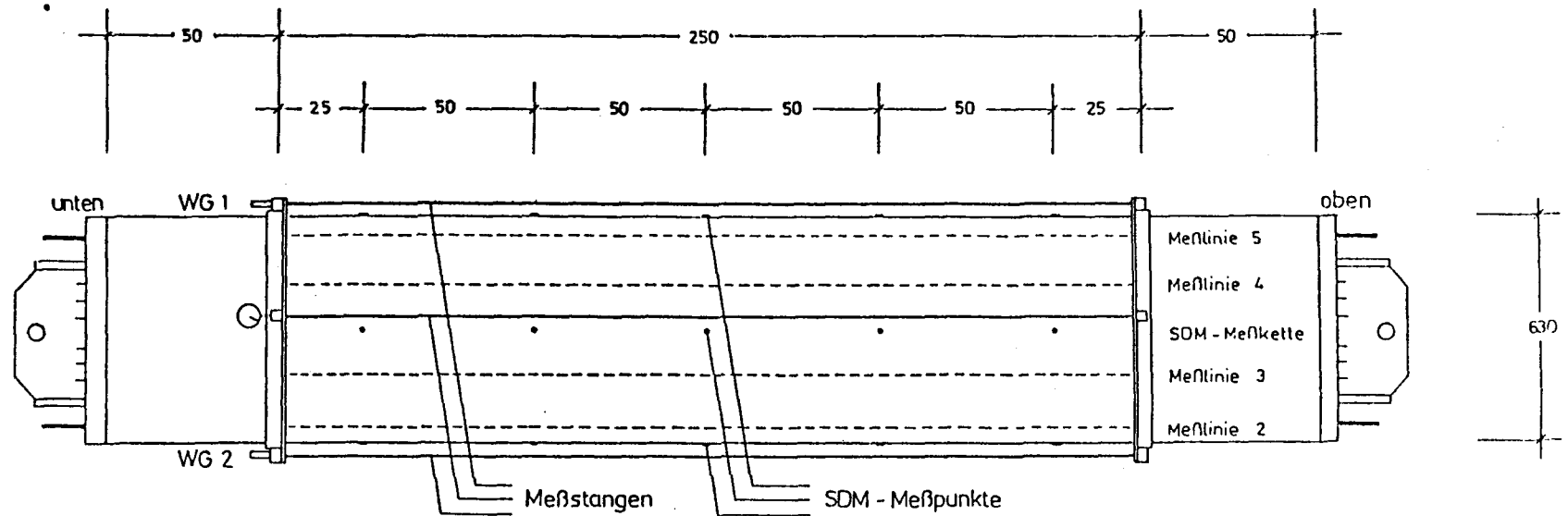


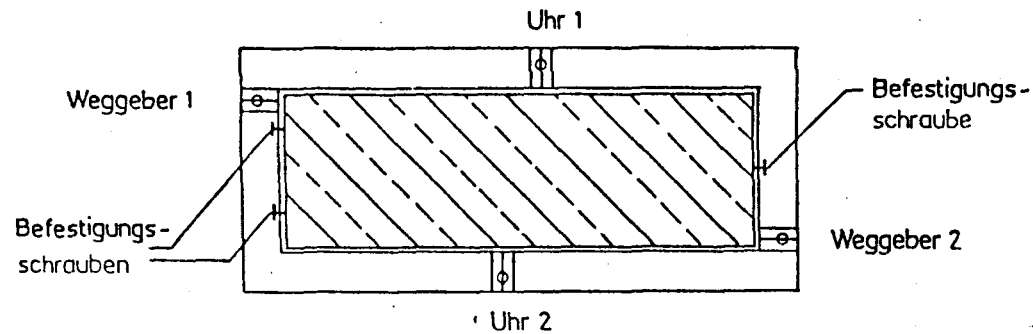
Abbildung 5.1: Prüfrahen mit Versuchskörper

Ansicht



Querschnitte :

Meßrahmen :



Rißmeßlinien :

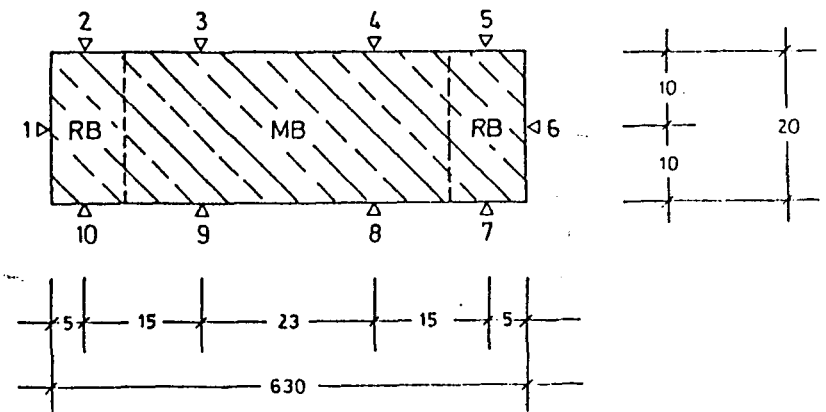


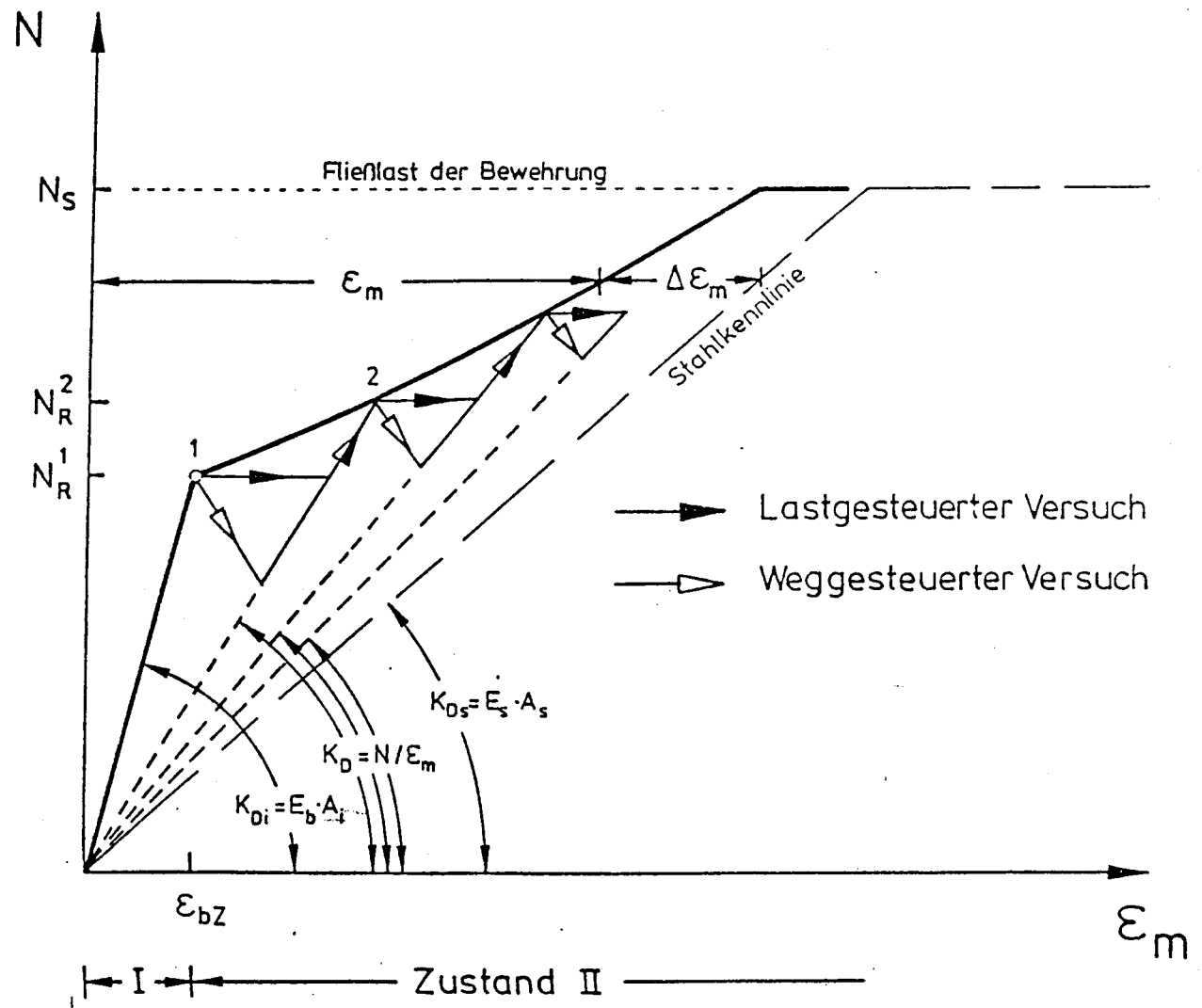
Abbildung 5.2: Anordnung der Meßsysteme

Abb. 5.3:

Versuchskörper im Prüfgerüst

Abb. 5.4:

**Maßnahmen mit Meßuhren und
Weggebern, Meßplättchen für
Rißbreitenmessung mit den
Tensotest-Setzdehnungsmessern**



ZK 20/0

SDM - Meßkette

Laststufe : 2

N = 215 kN

Laststufe : 5

N = 323 kN

Laststufe : 7a

N = 400 kN

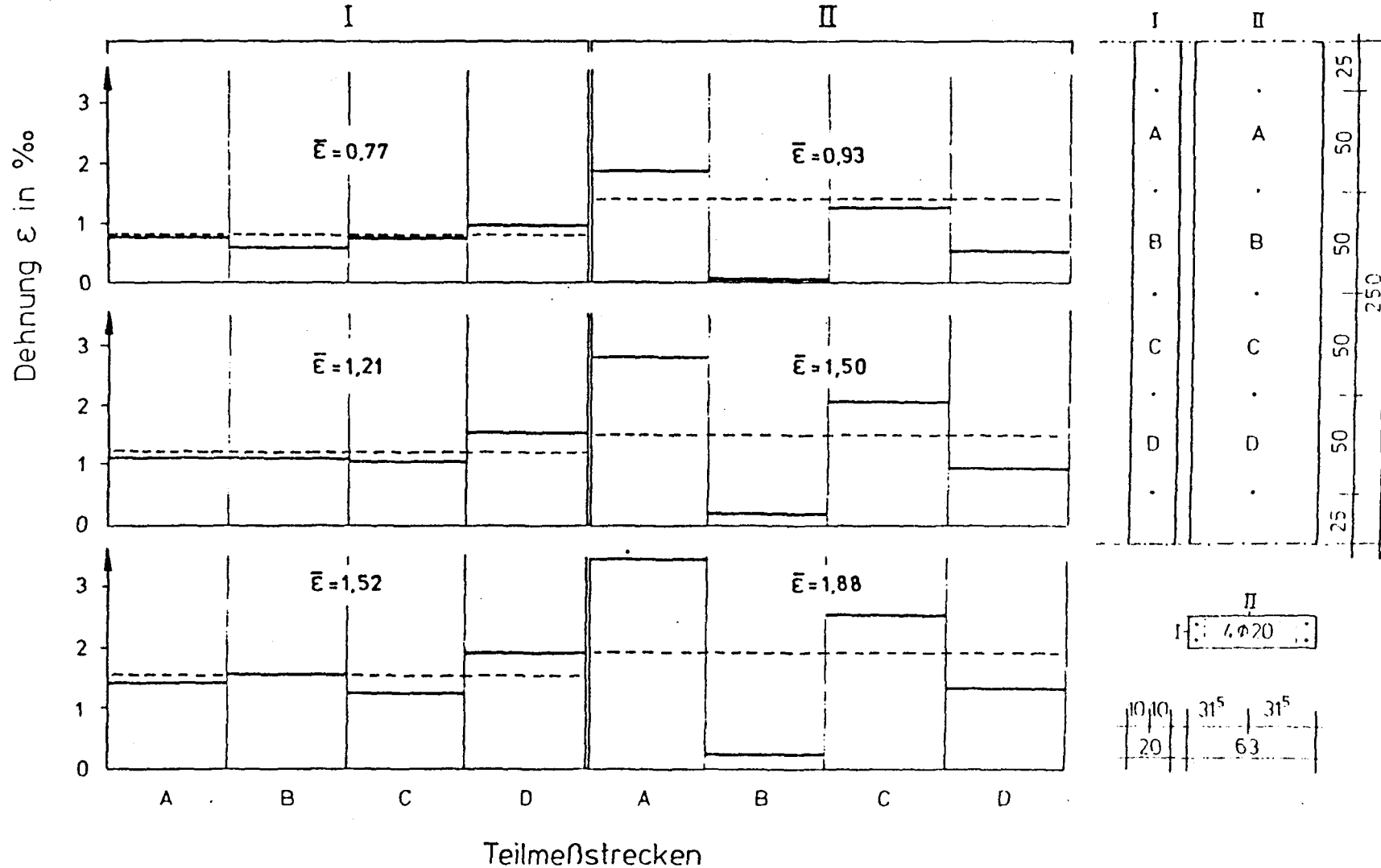


Abbildung 6.2: Mit dem Setzdehnungsmesser (SDM) gemessene Dehnungsverteilung über die Länge des Versuchskörpers, Versuchskörper ohne Faserbeton

ZK 20/1,5

SDM - Meßkette

Laststufe : 2

N = 207 kN

Laststufe : 5

N = 315 kN

Laststufe : 7a

N = 392 kN

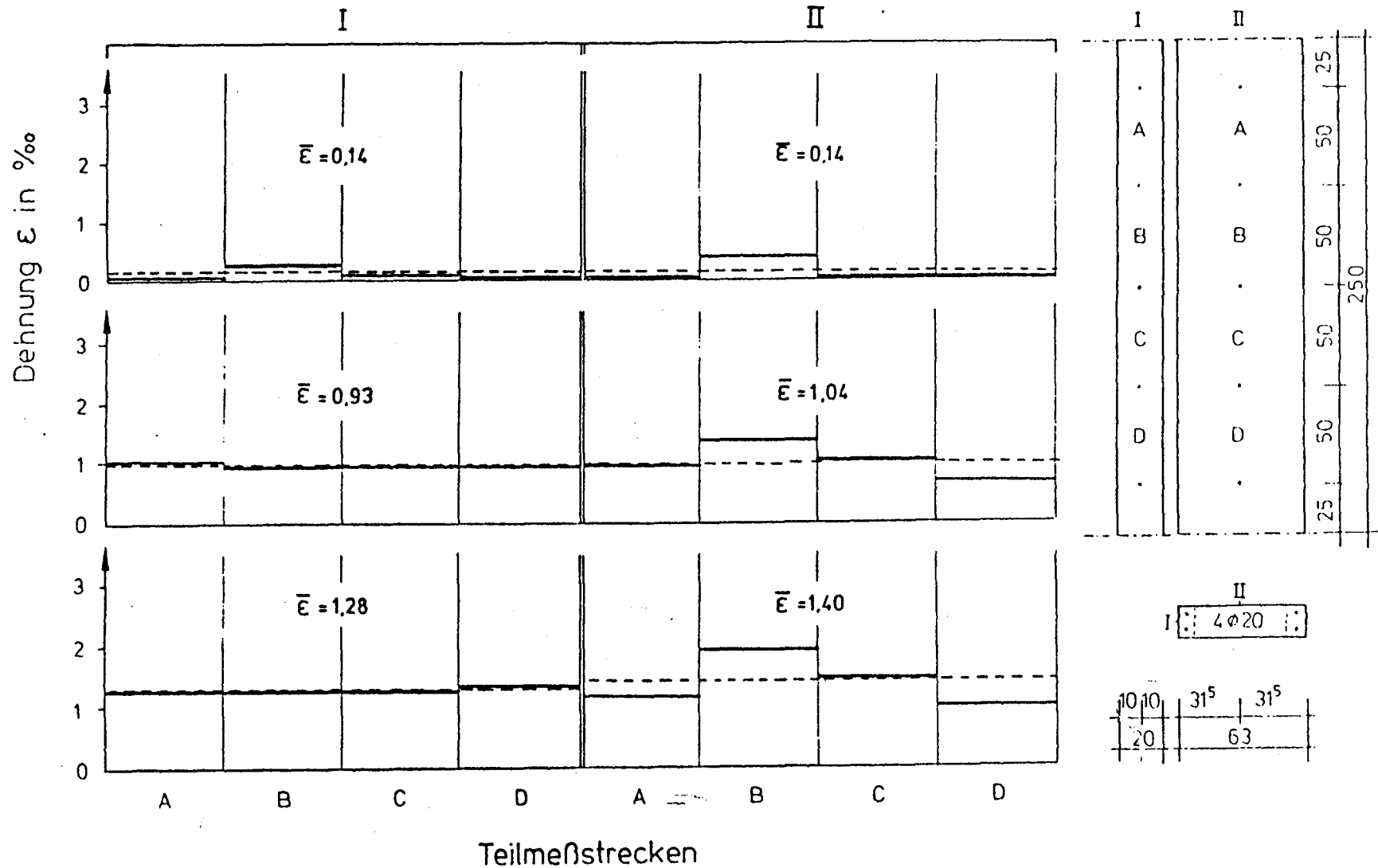


Abbildung 6.3: Mit dem Setzdehnungsmesser (SDM) gemessene Dehnungsverteilung über die Länge des Versuchskörpers, Versuchskörper mit Faserbeton

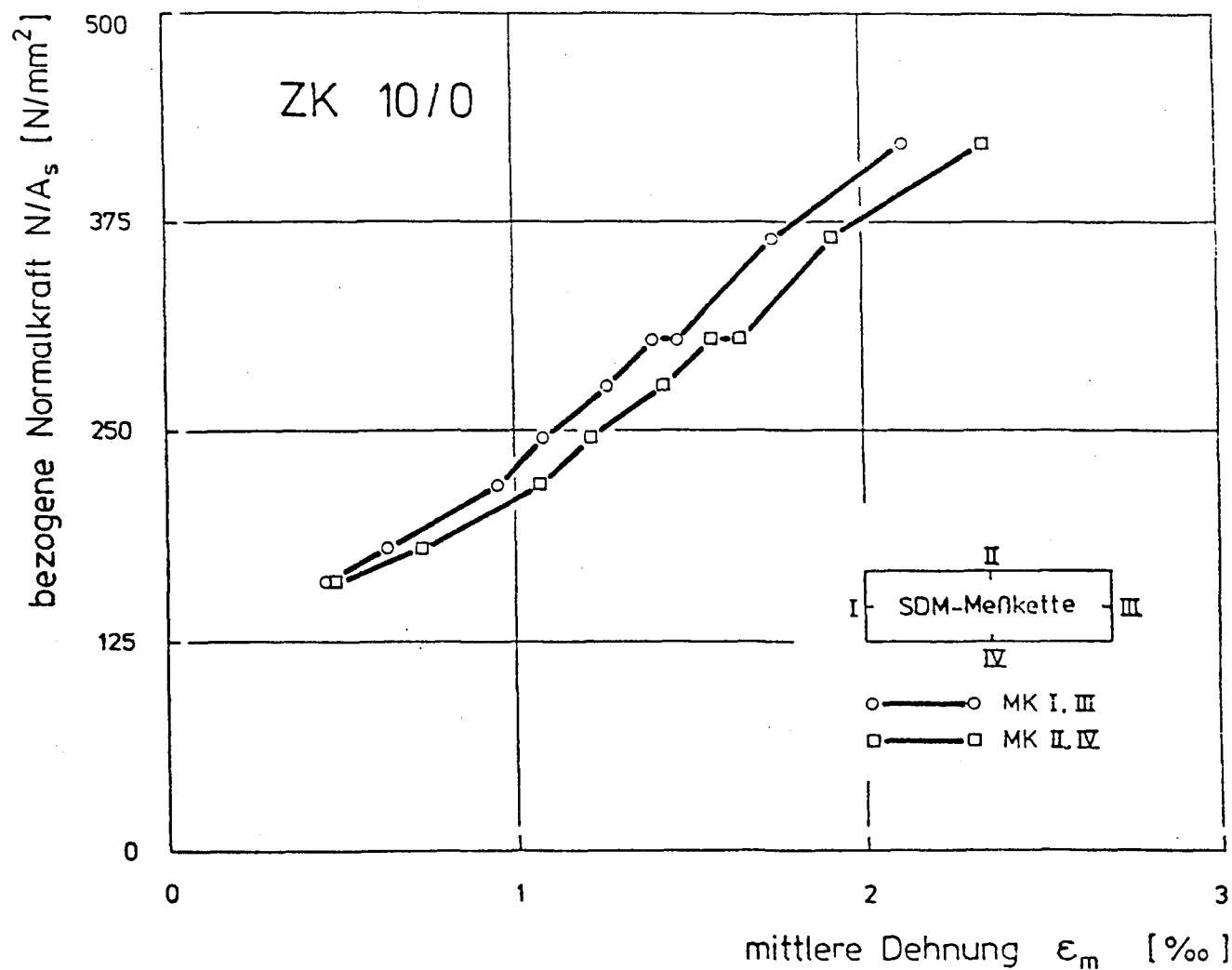


Abbildung 6.4: Mittlere Dehnung auf den schmalen bzw. auf den breiten Seitenflächen, Versuchskörper ZK 10/0

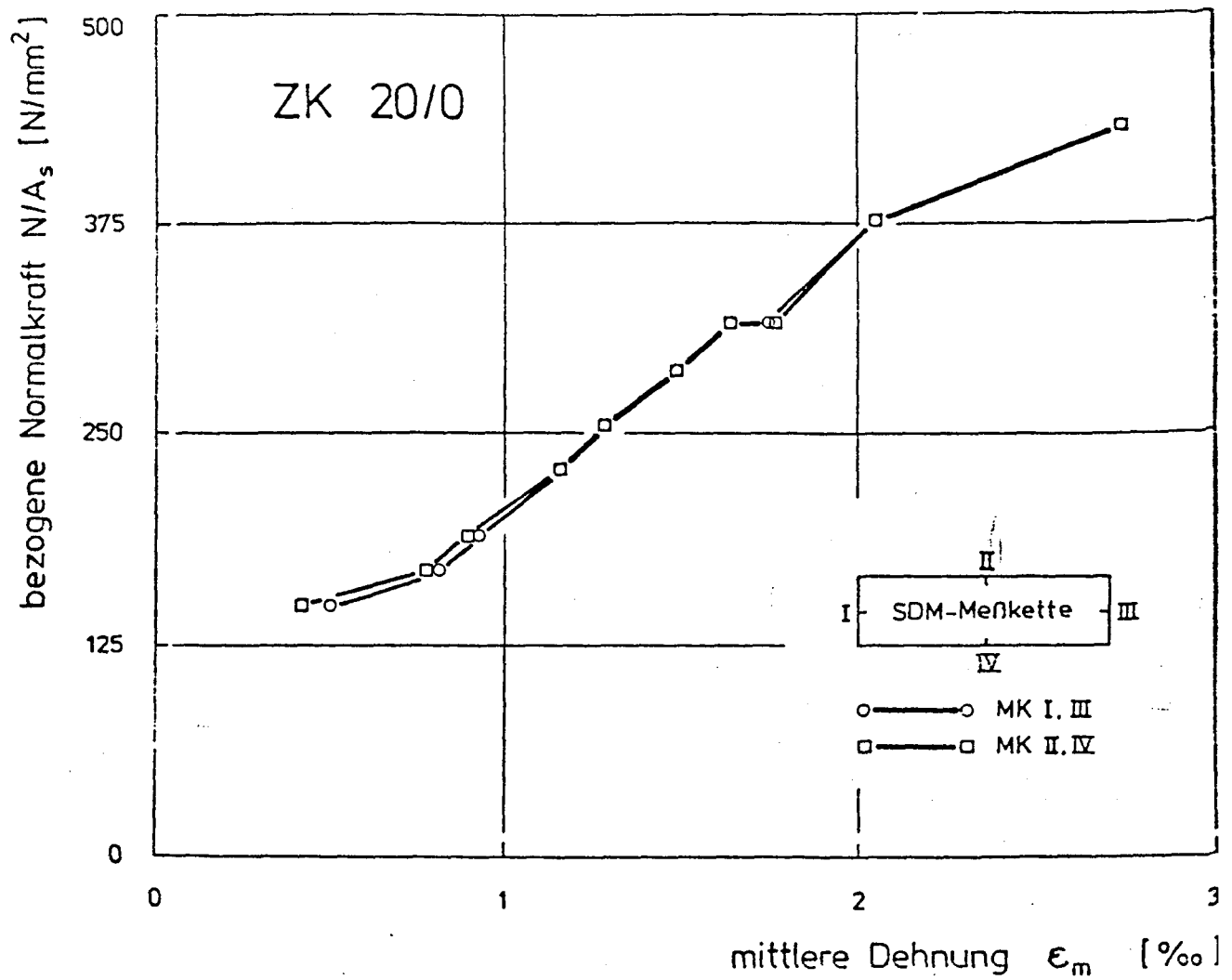


Abbildung 6.5: Mittlere Dehnung auf den schmalen bzw. auf den breiten Seitenflächen, Versuchskörper ZK 20/0

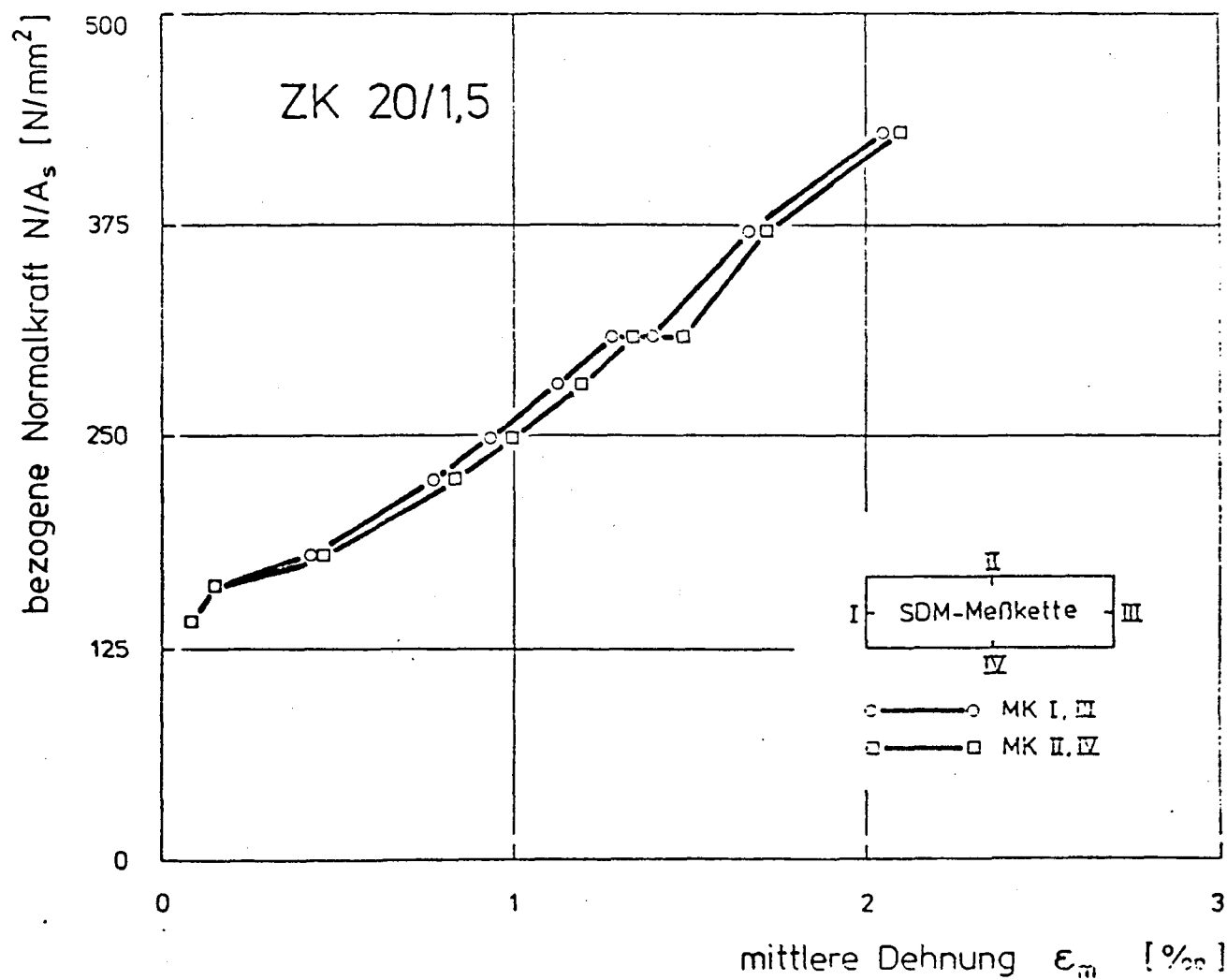


Abbildung 6.6: Mittlere Dehnung auf den schmalen bzw. auf den breiten Seitenflächen, Versuchskörper ZK 20/1,5

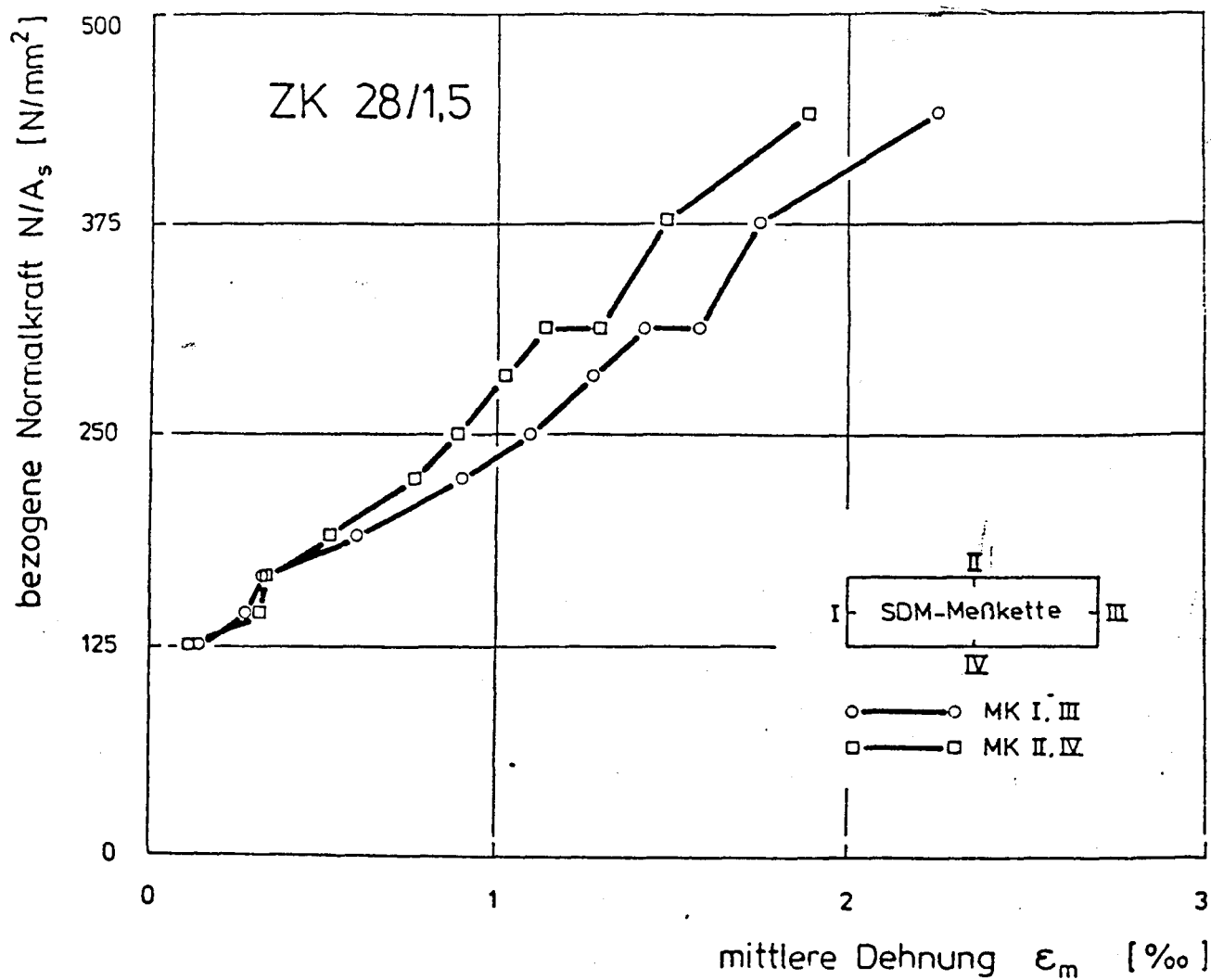


Abbildung 6.7: Mittlere Dehnung auf den schmalen bzw. auf den breiten Seitenflächen, Versuchskörper ZK 28/1,5

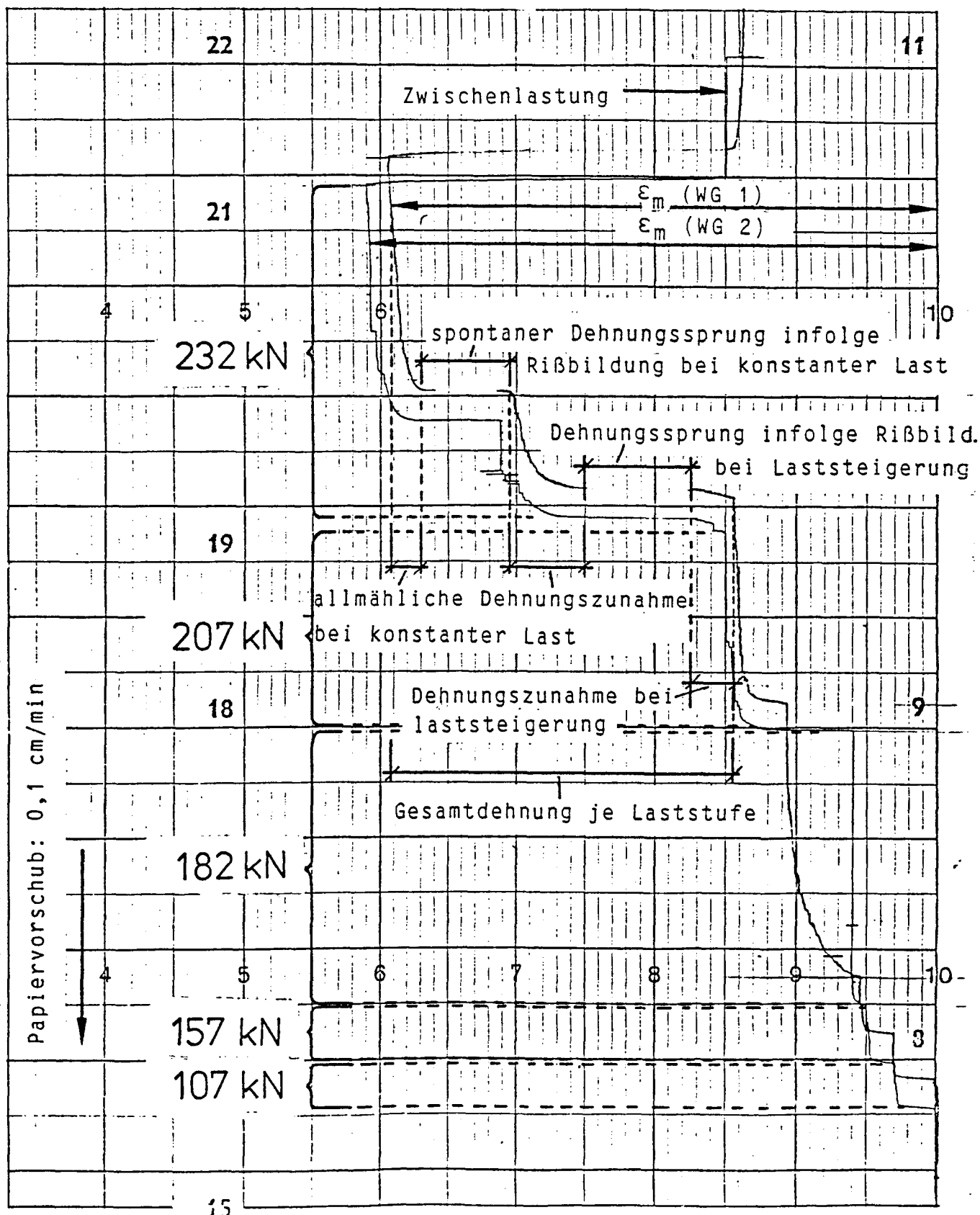


Abbildung 6.8: gemessene Dehnung des Versuchskörpers ZK 28/1,5;
Aufschrieb des Zeit-Linien-Schreibers

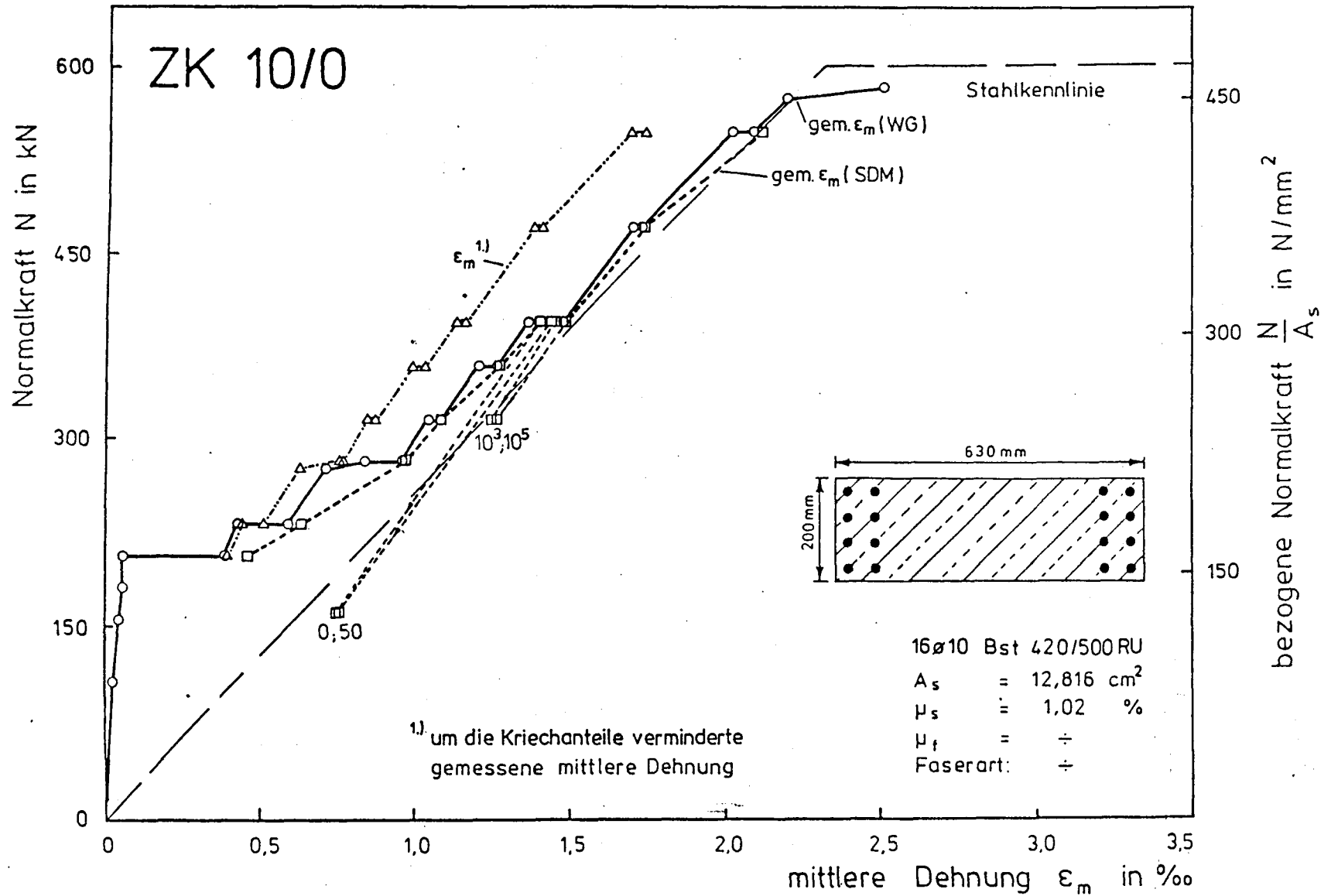


Abbildung 6.9: Gemessener Normalkraft-Dehnungsverlauf von Versuchskörper ZK 10/0

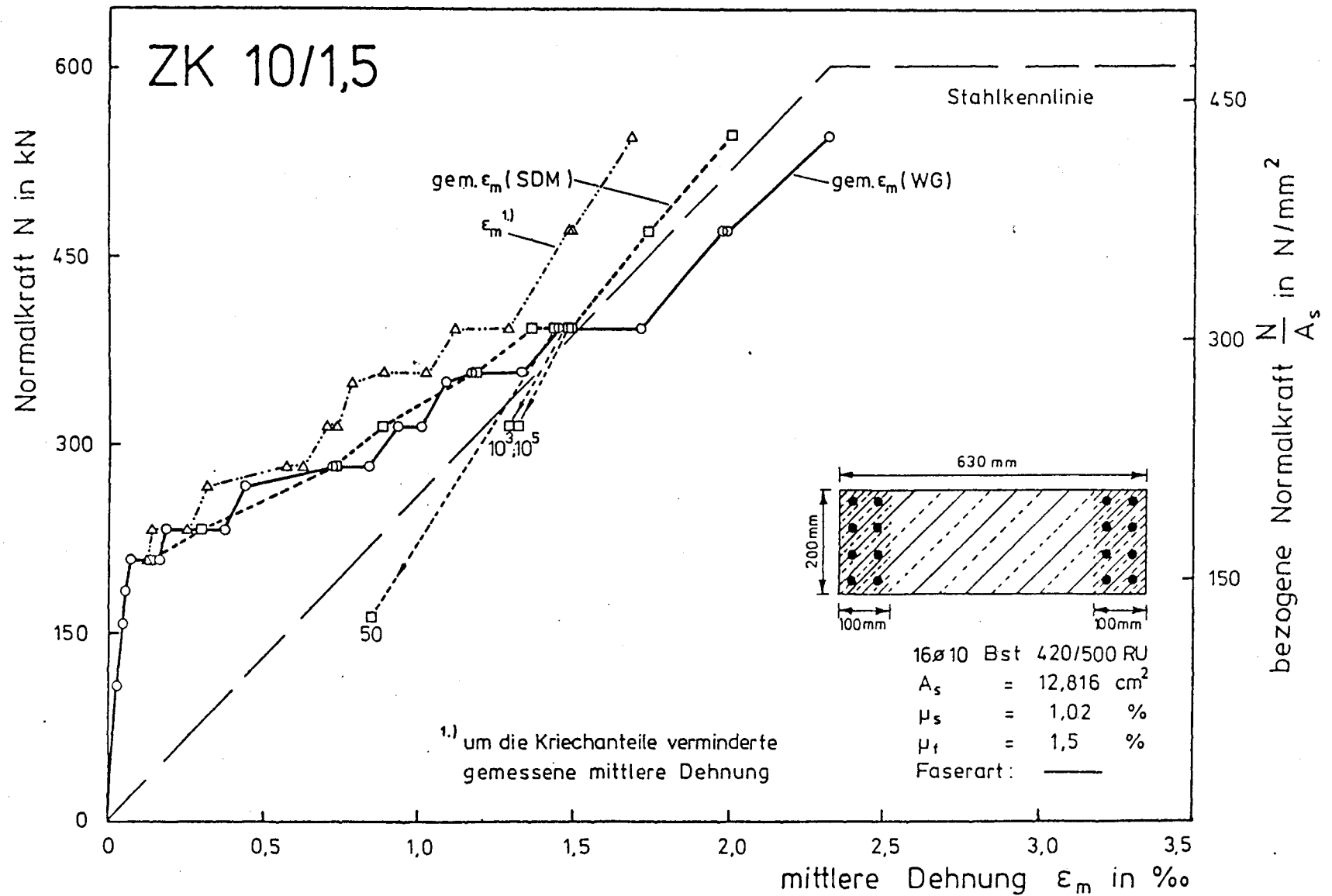


Abbildung 6.10: Gemessener Normalkraft-Dehnungsverlauf von Versuchskörper ZK 10/1,5

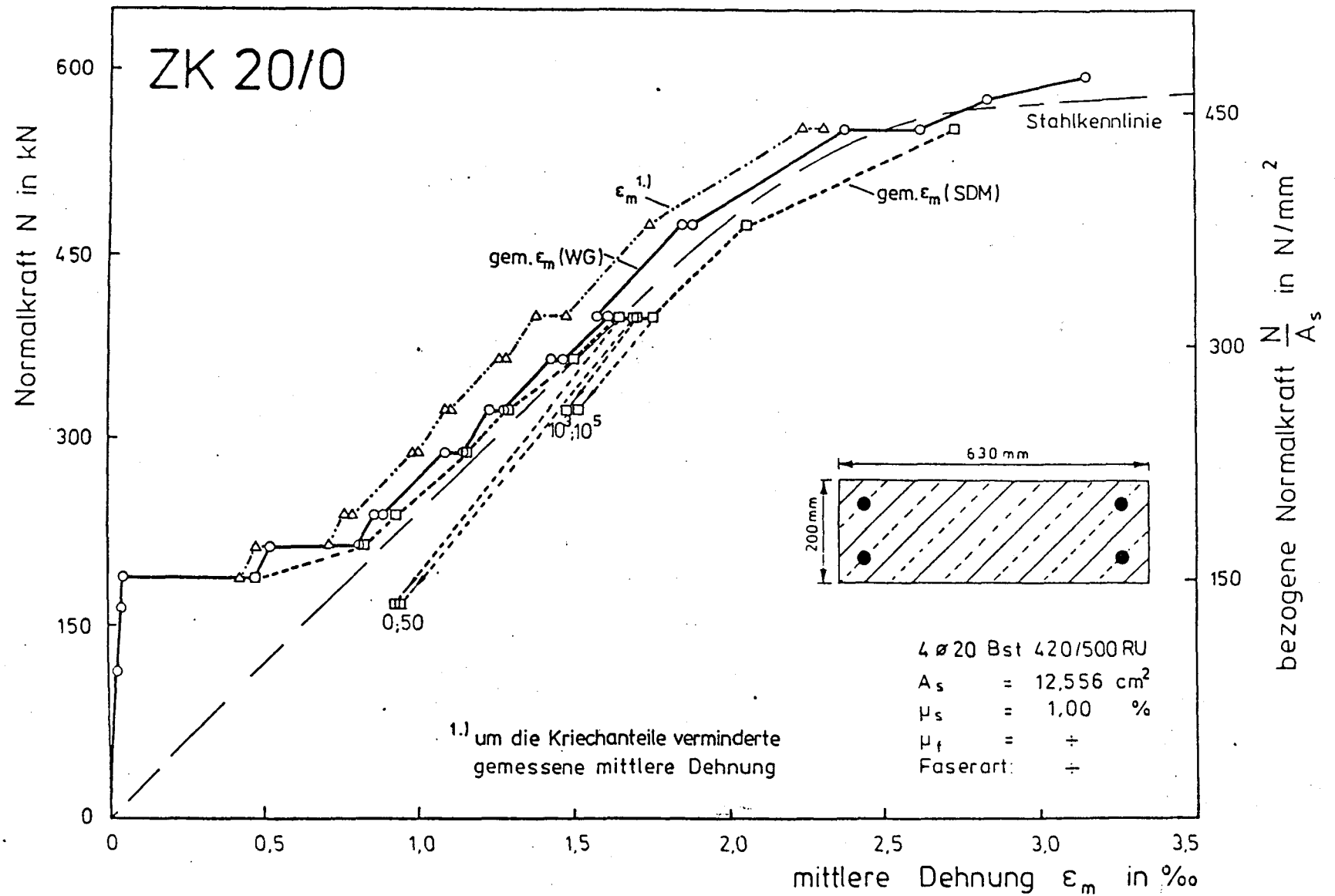


Abbildung 6.11: Gemessener Normalkraft-Dehnungsverlauf von Versuchskörper ZK 20/0

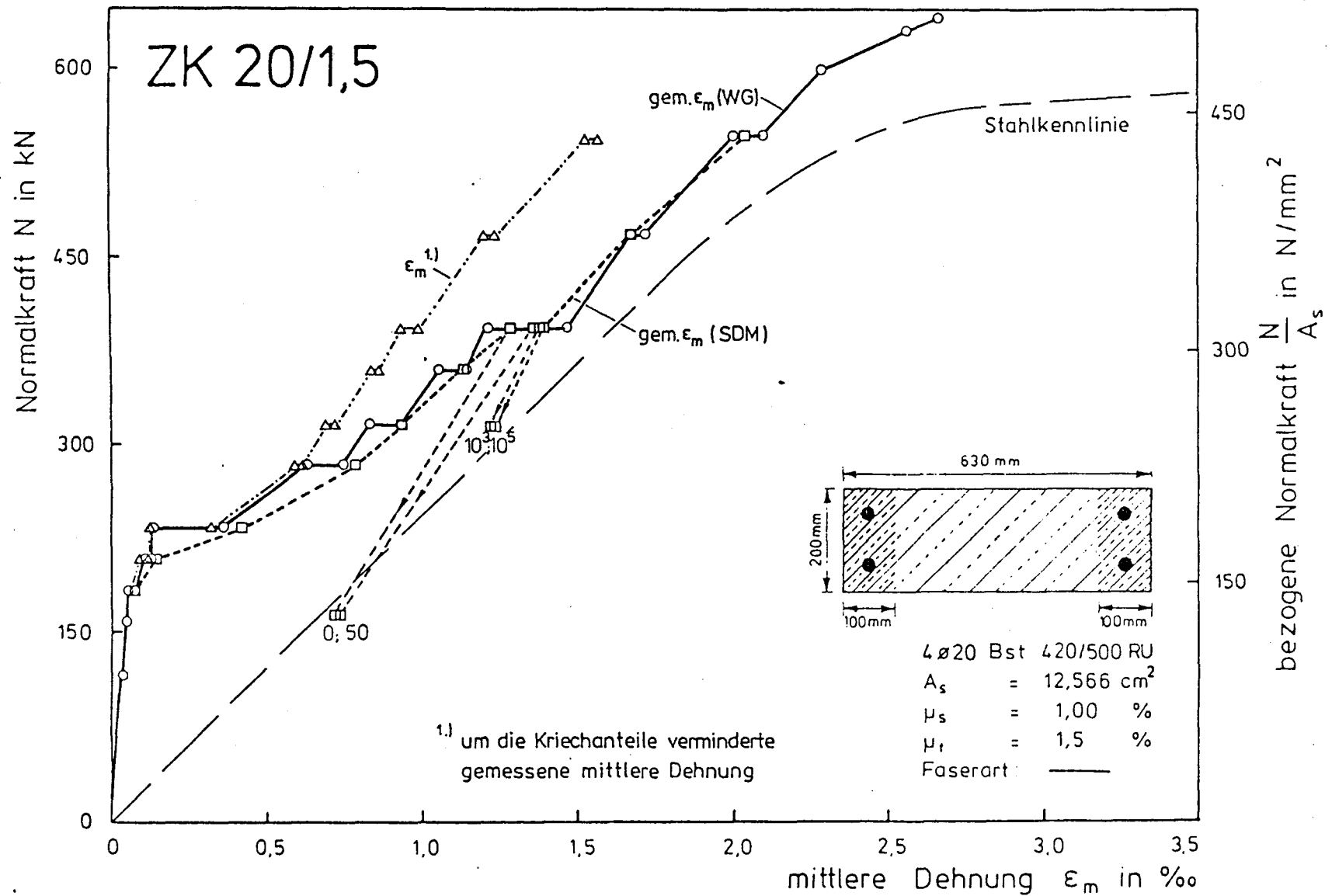


Abbildung 6.12: Gemessener Normalkraft-Dehnungsverlauf von Versuchskörper ZK 20/1,5

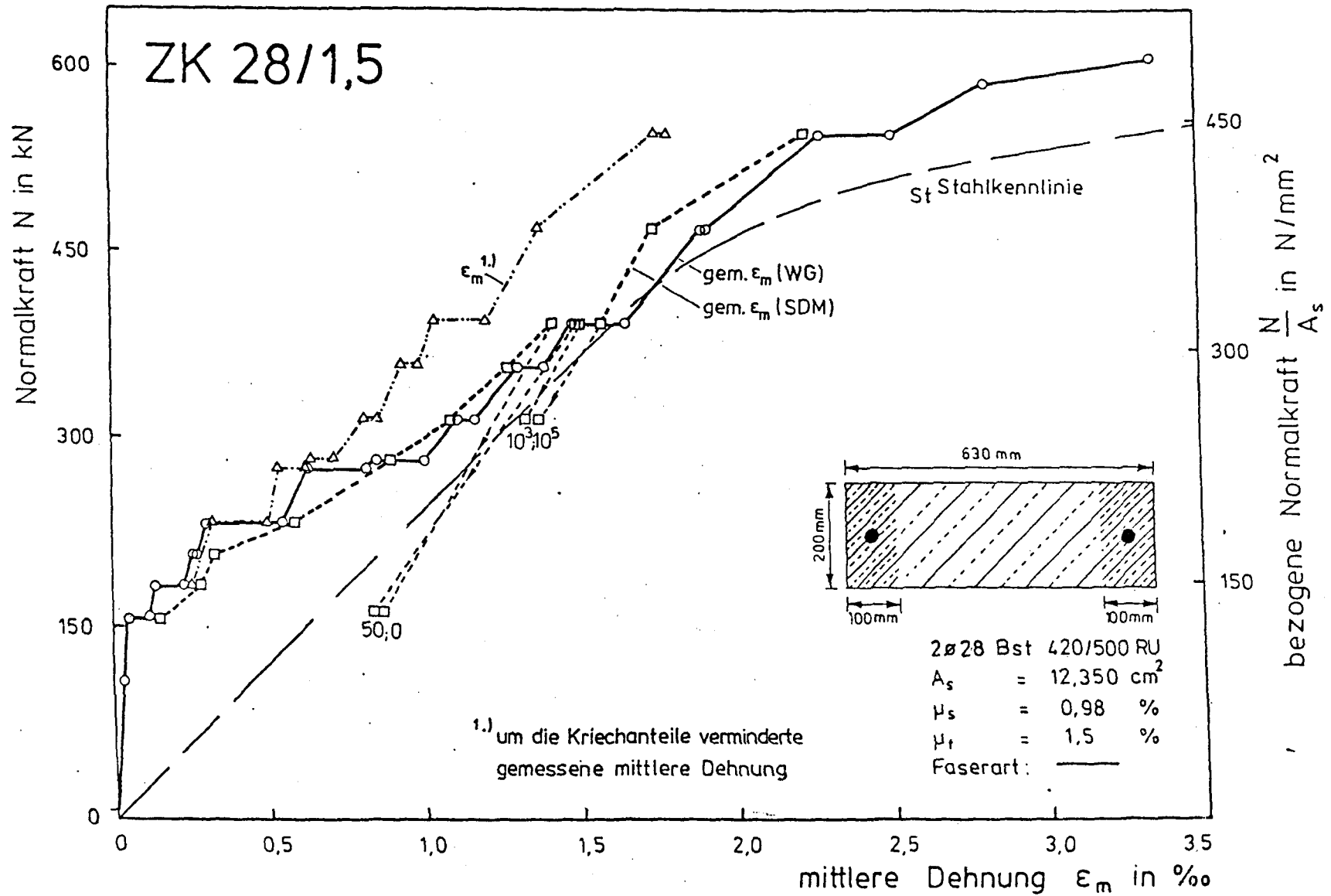


Abbildung 6.13: Gemessener Normalkraft-Dehnungsverlauf von Versuchskörper ZK 28/1,5

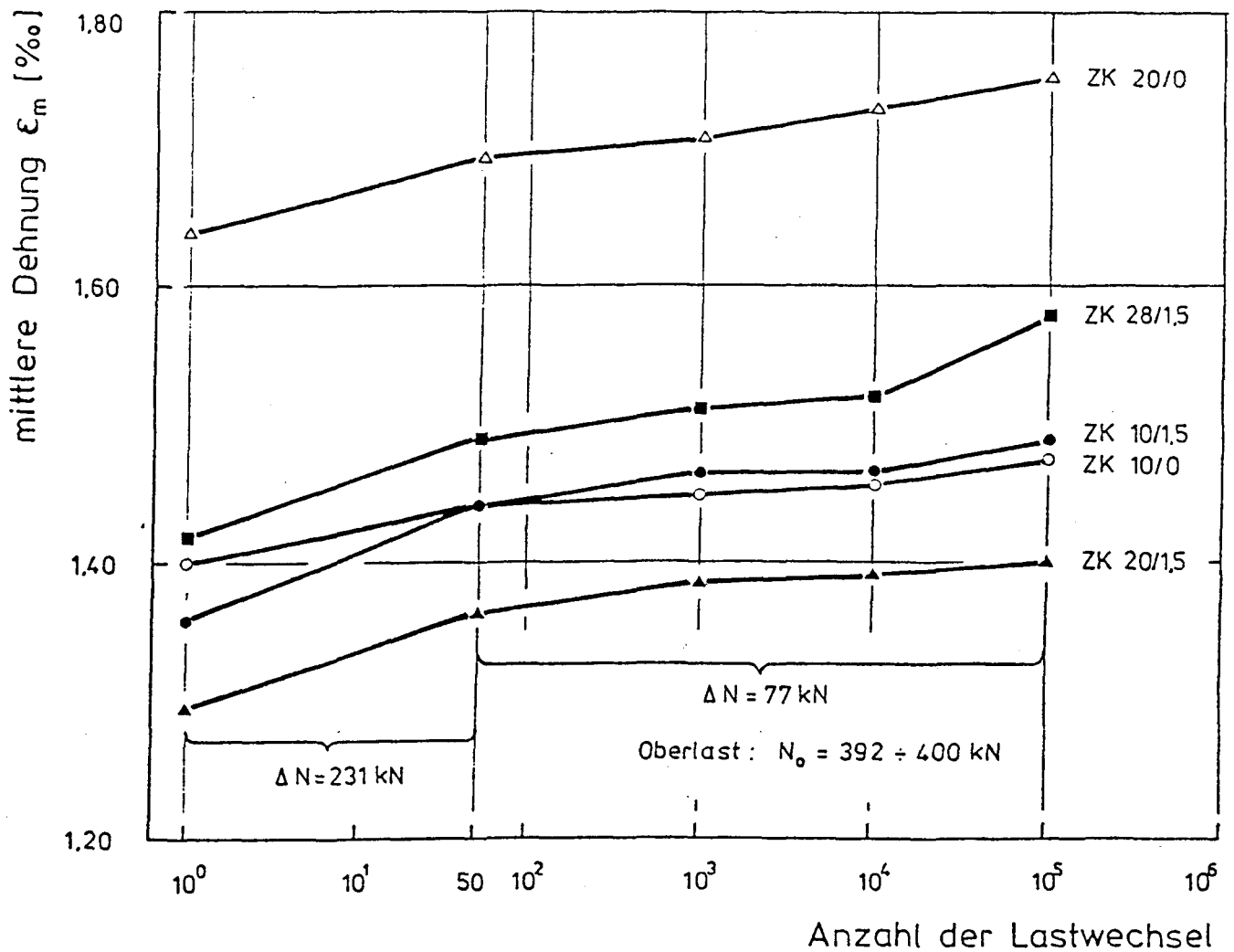


Abbildung 6.14: Zunahme der mittleren Dehnung ϵ_m an der Oberlast infolge schwingender Beanspruchung

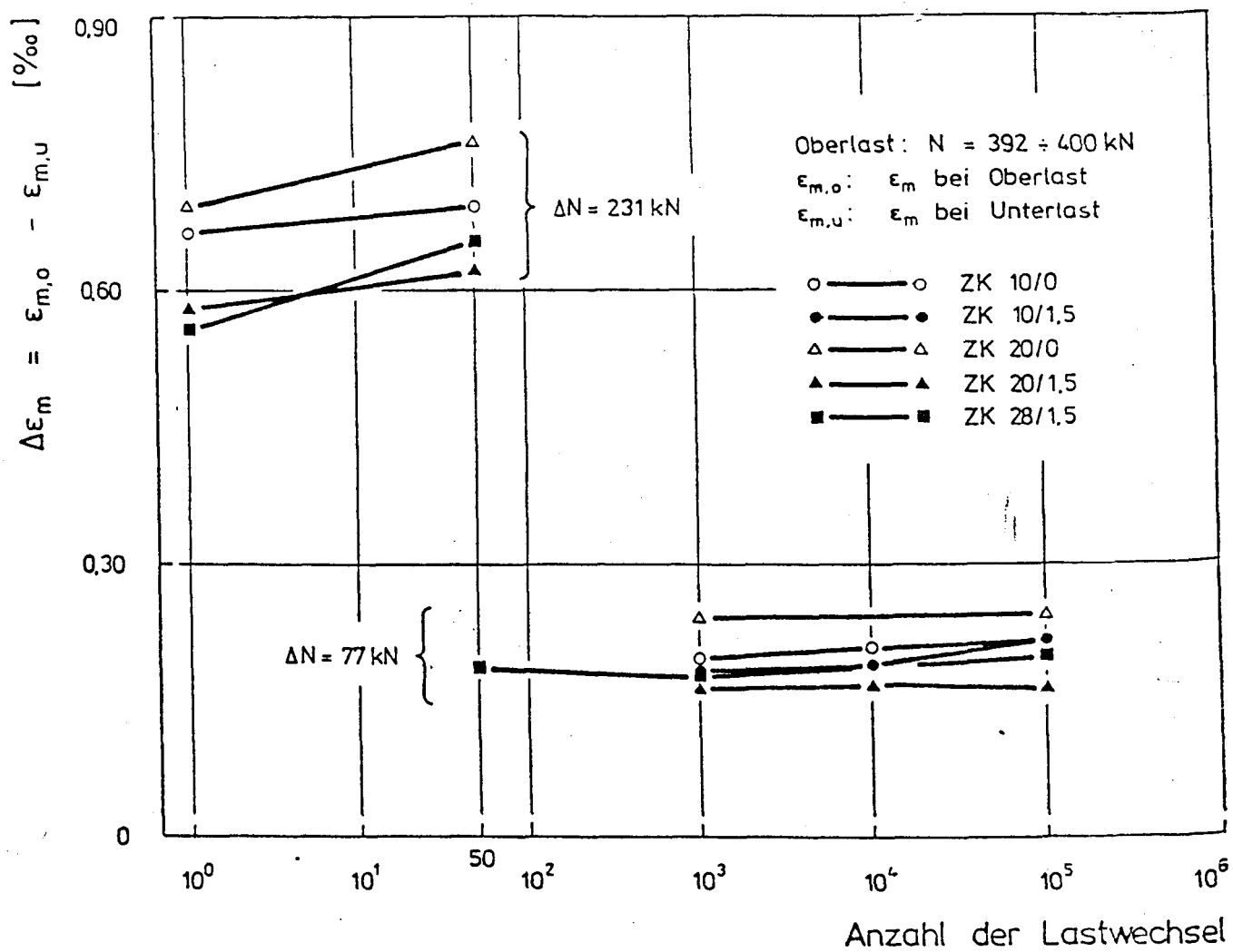


Abbildung 6.15: Verlauf der Differenzdehnung $\Delta \epsilon_m = \epsilon_{m,o} - \epsilon_{m,n}$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel

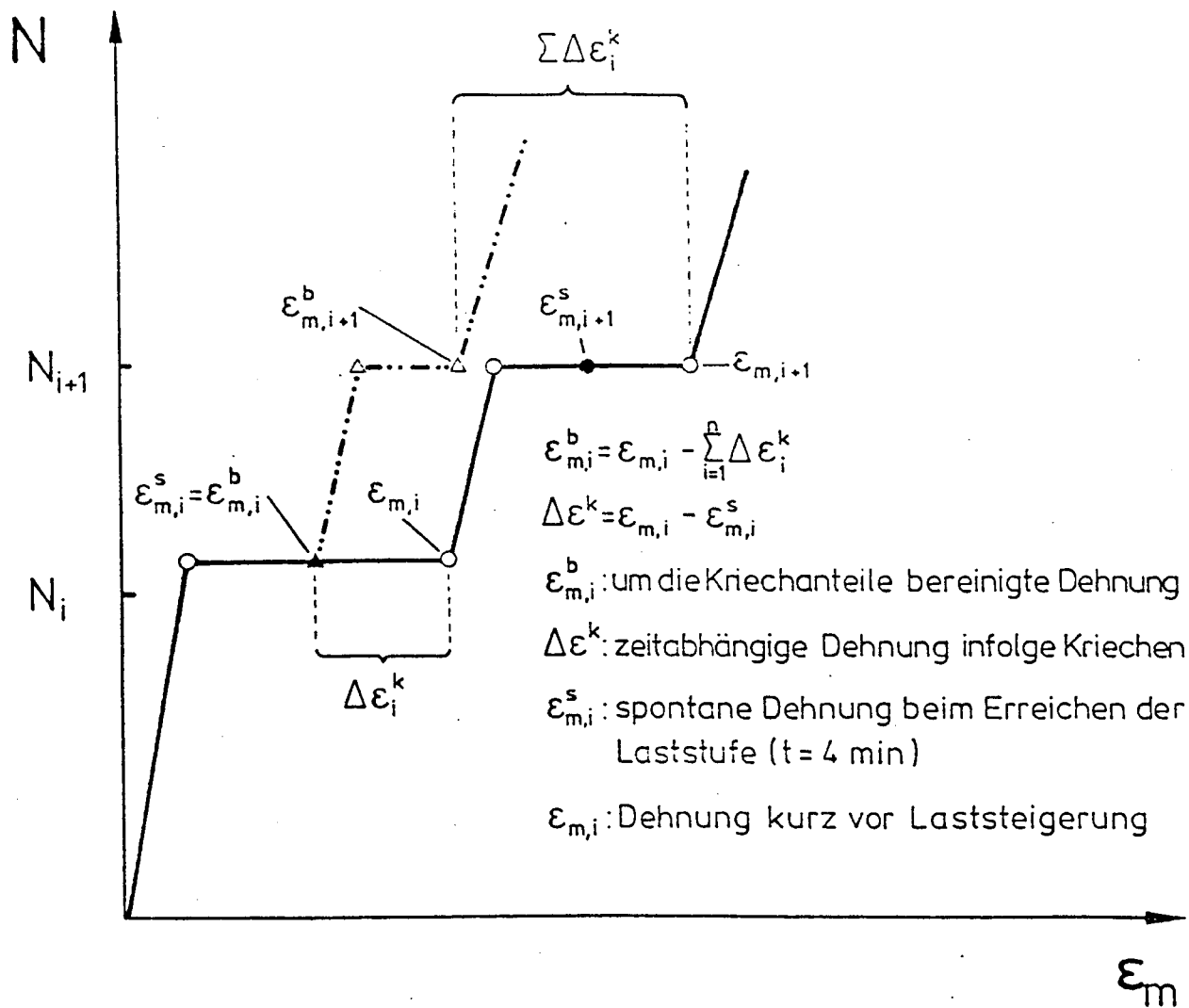


Abbildung 6.16: Schematische Darstellung der Bereinigung der mittleren Dehnungen um den Anteil aus Kriechen

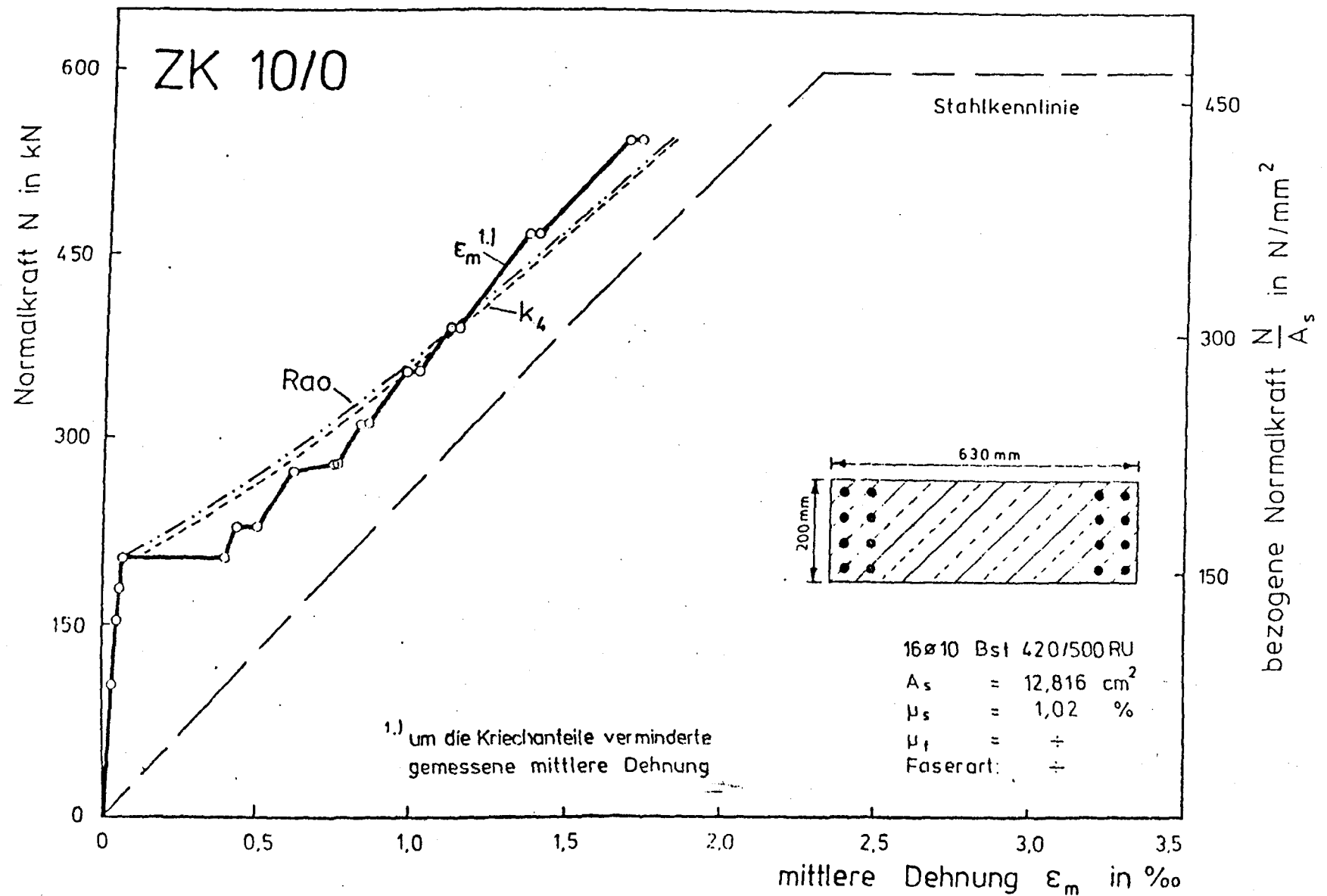


Abbildung 6.17: Vergleich der Normalkraft-Dehnungslinie von ZK 10/0 mit theoretischen Kurvenverläufen

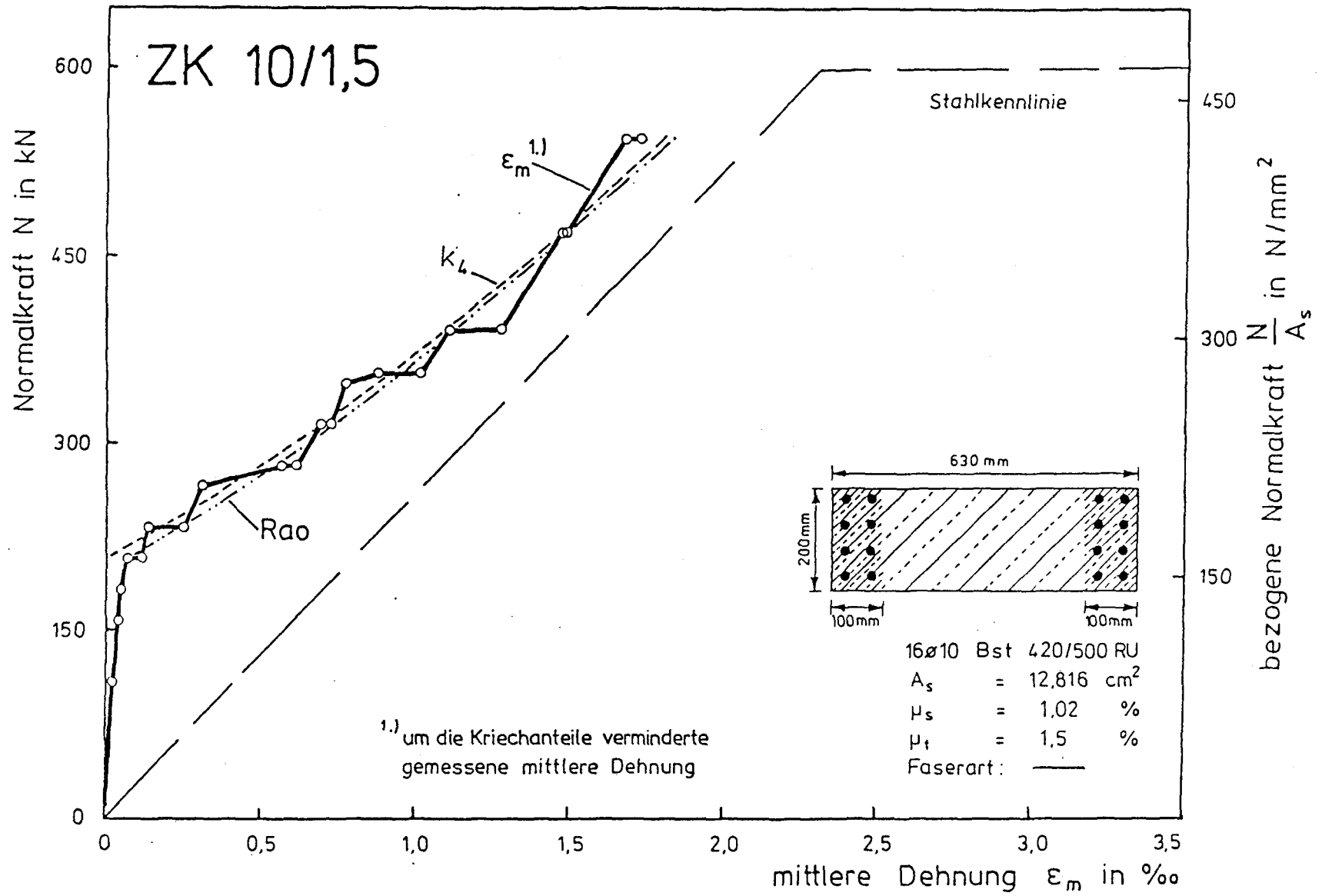


Abbildung 6.18: Vergleich der Normalkraft-Dehnungslinie von ZK 10/1,5 mit theoretischen Kurvenverläufen

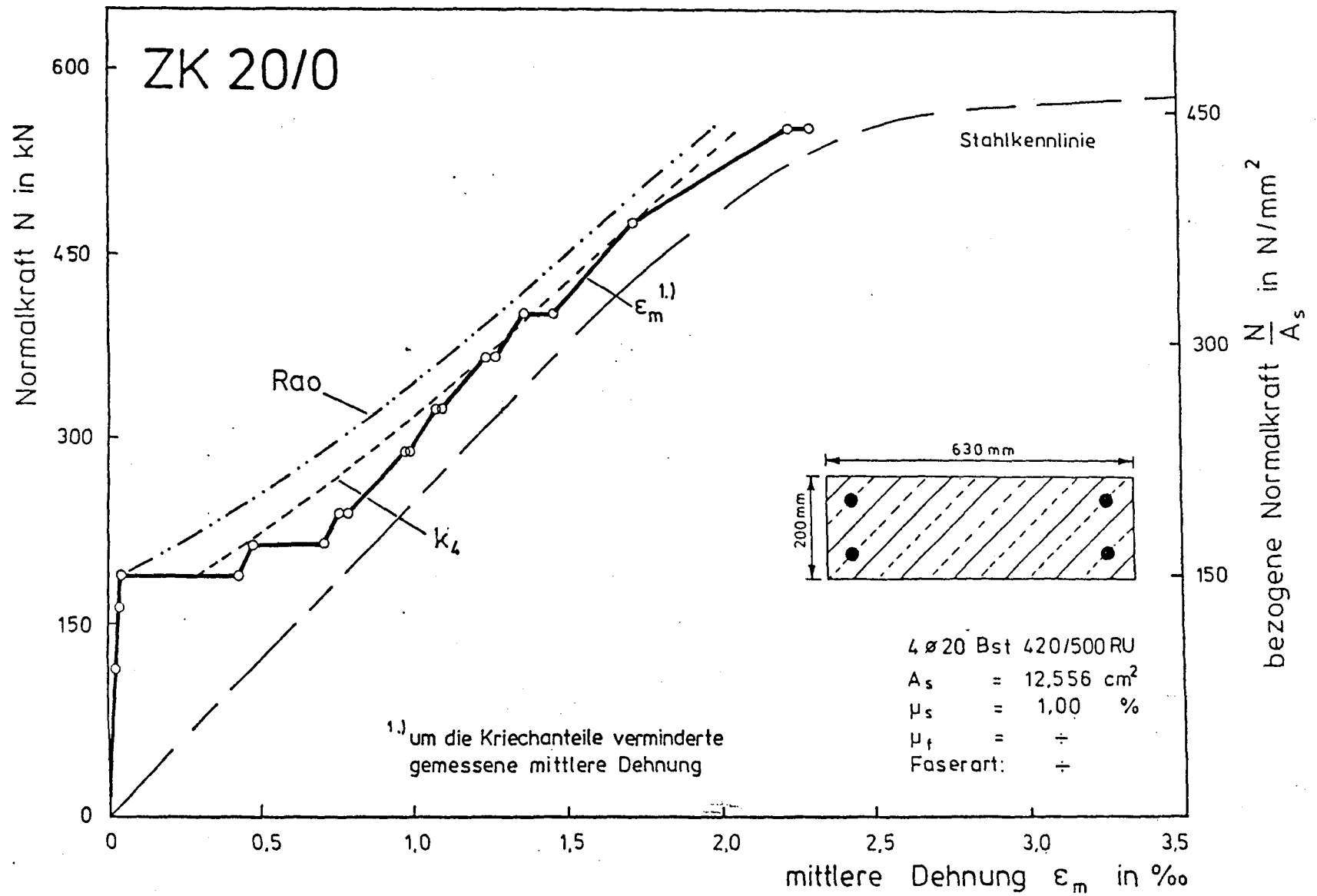


Abbildung 6.19: Vergleich der Normalkraft-Dehnungslinie von ZK 20/0 mit theoretischen Kurvenverläufen

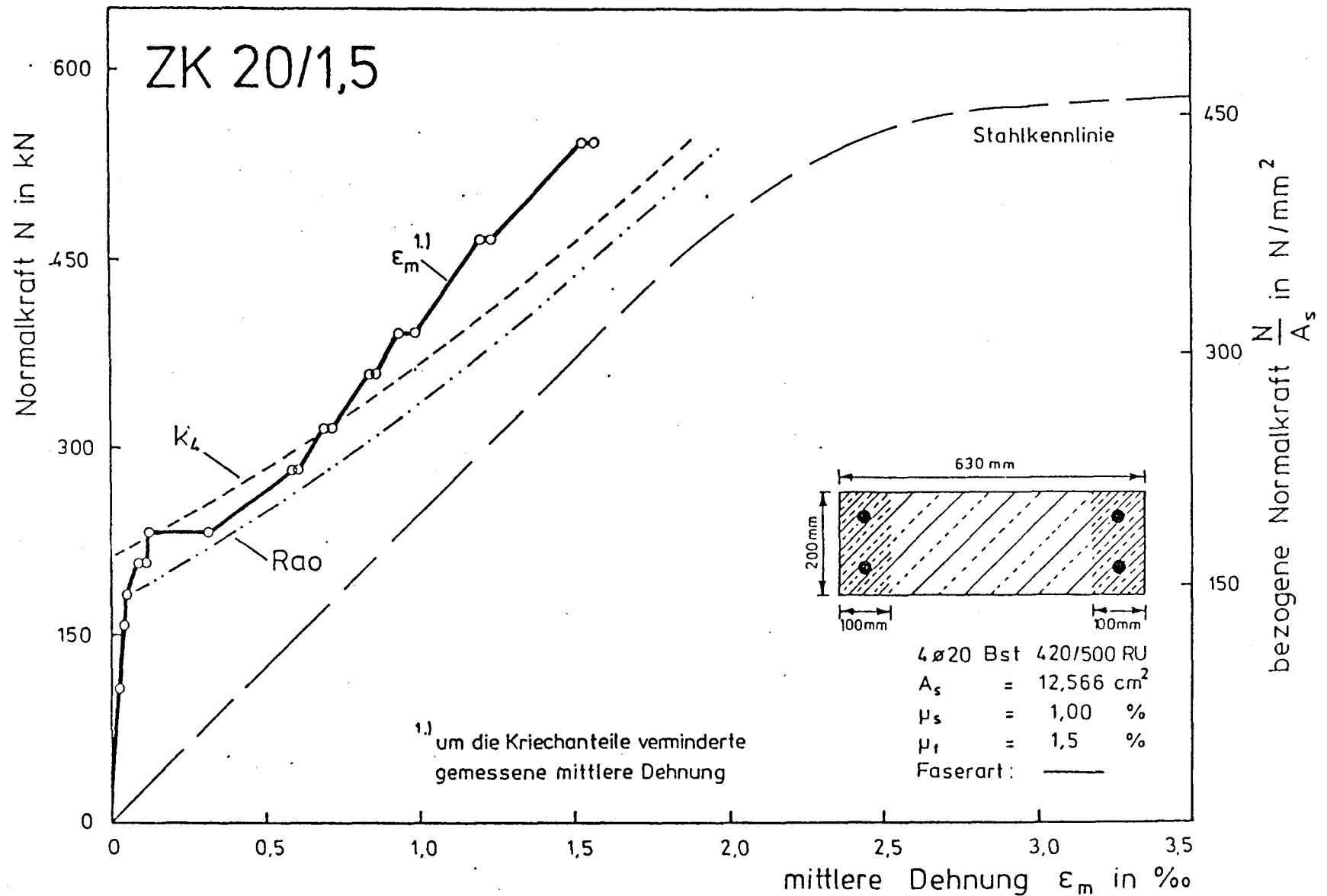


Abbildung 6.20: Vergleich der Normalkraft-Dehnungslinie von ZK 20/1,5 mit theoretischen Kurvenverläufen

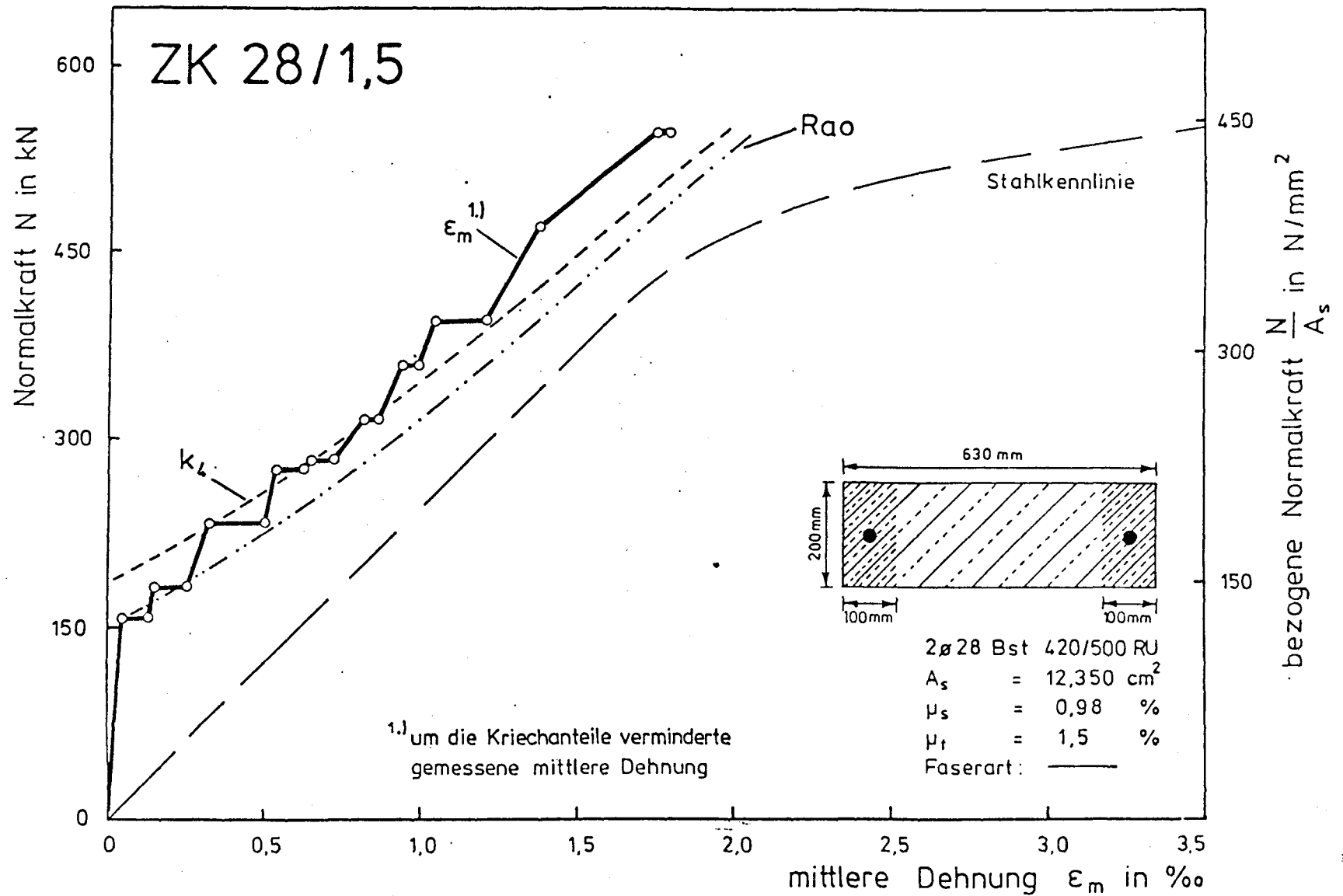


Abbildung 6.21: Vergleich der Normalkraft-Dehnungslinie von ZK 28/1,5 mit theoretischen Kurvenverläufen

ANHANG

Tabelle 2.1: Querschnittswerte der Versuchskörper

	Zk 10/0	Zk 10/1,5	Zk 20/0	Zk 20/1,5	Zk 28/1,5
Bewehrung	16 Ø 10	16 Ø 10	4 Ø 20	4 Ø 20	2 Ø 28
Bewehrungsquerschnitt A_s [mm ²]	1281,6	1281,6	1255,6	1255,6	1235,0
Bewehrungsgehalt μ_s [%]	1,02	1,02	1,00	1,00	0,98
d_s/μ_s [cm]	99,0	99,0	200,0	200,0	285,7
effektive Breite der Betonzugzone (gem. CEB) b_{eff} [cm]	2 x 15,0	2 x 15,0	2 x 20,0	2 x 20,0	2 x 26,0
effektiver Beweh- rungsgehalt $\mu_{s,eff} = \frac{A_s}{b_{eff} \cdot d}$ [%]	2,14	2,14	1,57	1,57	1,19
Betondeckung zur schmalen Seiten- fläche c_s [cm]	2,0	2,0	4,0	4,0	3,6
Betondeckung zur brei- ten Seitenfläche c_b [cm]	2,0	2,0	4,0	4,0	8,6
Fasergehalt μ_f [Vol-%]	0	1,50	0	1,50	1,50
<u>Fasergehalt x Faserlänge</u> Faserdicke	-	93,8	-	93,8	93,8

Tabelle 4.1: Kornzusammensetzung, Grenzlinien der Sieblinien

Versuchskörper	Durchgang im Gew-% durch die Siebe							
	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
Zk 10/0	5,6	19,3	33,6	40,8	53,8	87,2	98,6	100
Zk 10/1,5	5,6	19,3	33,6	40,8	53,8	87,2	98,6	100
Zk 20/0	5,5	19,6	34,0	40,6	54,7	86,9	98,3	100
Zk 20/1,5	5,5	19,6	34,0	40,6	54,7	86,9	98,3	100
Zk 28/1,5	6,1	22,2	38,7	46,0	59,2	88,3	98,5	100

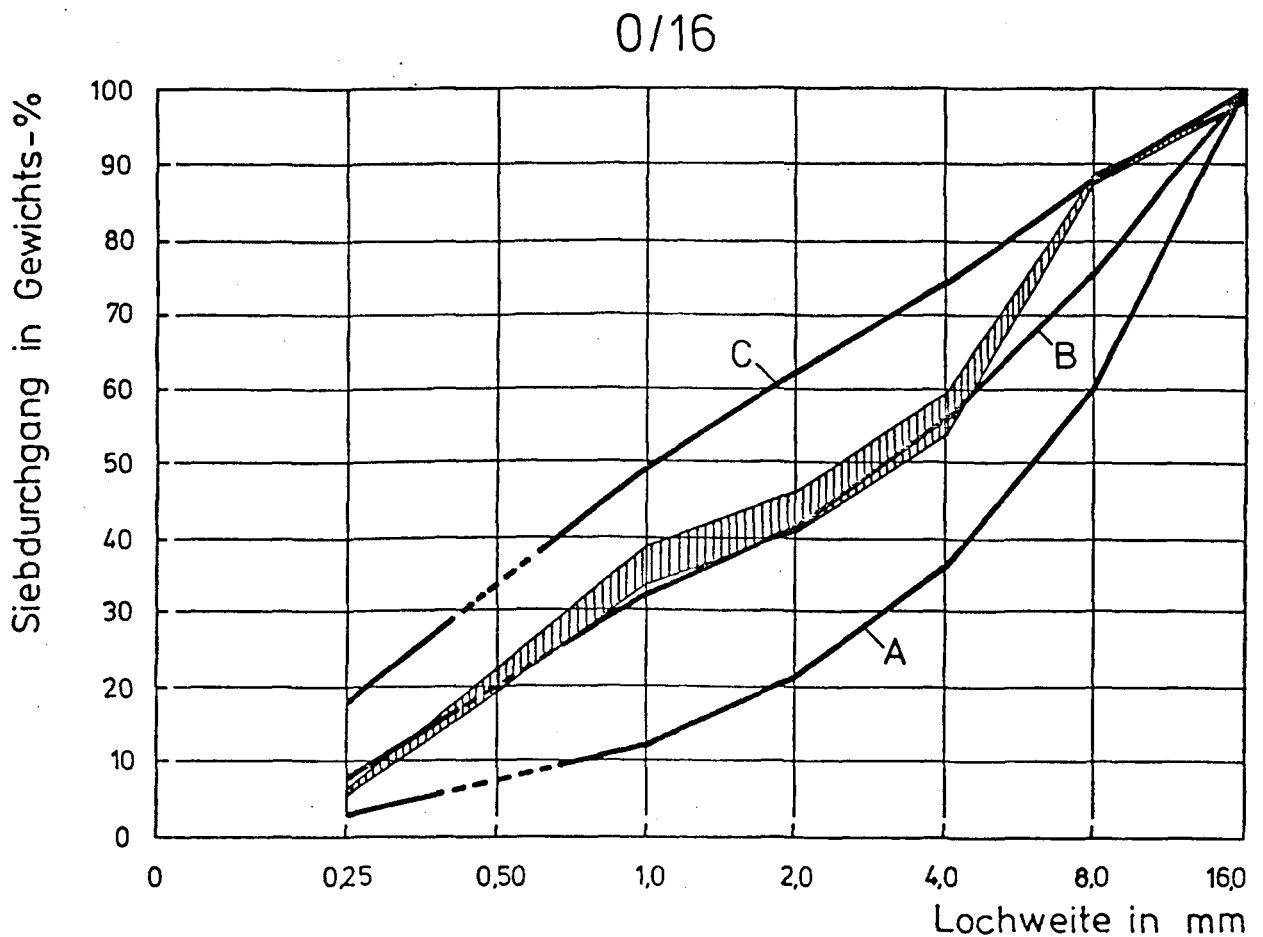


Tabelle 4.2: Zusammensetzung je m³ verdichteten Frischbetons

Anteil		Gewicht je m ³	
Zement: PZ 35F		313	kg
Wasser		219	kg
W/Z-Wert = 0,70			
Zuschlag: 0/2	40 %	687,2	kg
2/8	50 %	859,0	kg
8/16	10 %	<u>171,8</u>	1718 kg
Fasern: Wirex 0,4/25 mm		117,9	kg

Tabelle 4.3: Betonfestigkeiten

Probenbez.		$\frac{\text{Alter (d)}}{\text{Anz. d. Proben}}$	\bar{B}_D (N/mm ²)	$\frac{\text{Alter (d)}}{\text{Anz. d. Proben}}$	\bar{B}_{SZ} (N/mm ²)	$\frac{\text{Alter (d)}}{\text{Anz. d. Proben}}$	\bar{B}_Z (N/mm ²)	B_Z^{N1}
ZK 10/1,5	NB	30/4	41,0	28/3	2,40	29/1	1,08	1,52
	FB	30/3	42,0	28/3	3,90	29/2	1,50	
ZK 10/0	NB	28/4	40,3	29/3	2,45	29/3	1,93	1,50
		32/2	41,0	-	-	-	-	
ZK 20/1,5	NB	28/3	36,8	29/1	3,15	30/2	1,66	1,42
	FB	28/3	37,7	35/1	3,55	30/2	1,89	
ZK 20/0	NB	44/4	45,8	46/2	2,98	46/4	2,05	1,34
		65/2	48,5	-	-	-	-	
Zk 28/1,5	NB	38/4	42,3	28/1	2,29	44/2	2,20	1,16
	FB	38/3	37,0	28/1	3,78	45/2	2,28	

Tabelle 4.4: Festigkeiten und Elastizitätsmoduli der Betone; errechnet aus den Erstrißlasten und den Verformungen der Zugkörper

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zugkörper- bezeichnung	A_s	E_s	μ	N^1	ϵ_m^1	n	E_b	$\beta_{bz}^{N^1}$
Zk	mm ²	kN/mm ²	%	kN	‰	-	kN/mm ²	N/mm ²
10/0	1281,6	201,4	1,02	207,0	0,058	7,67	26,27	1,52
10/1,5	1281,6	201,4	1,02	207,0	0,070	9,41	21,41	1,50
20/0	1255,6	195,7	1,00	190,0	0,046	6,35	30,82	1,42
20/1,5	1255,6	195,7	1,00	182,0	0,052	7,58	25,82	1,34
28/1,5	1235,0	197,2	0,98	157,0	0,044	7,47	26,39	1,16

$$A_i = A_b \cdot (1 + n\mu); E_i = E_b (1 + n\mu); A_b = 126.000 \text{ mm}^2$$

$$n = E_s/E_b$$

$$E_i = \frac{E_s}{n} (1 + n\mu) = \frac{N^1}{A_b \cdot \epsilon_m^1}$$

$$\frac{E_i}{E_s} = \frac{1}{n} + \mu$$

$$n = \frac{1}{E_i/E_s - \mu} = \frac{1}{\frac{N}{A_b \cdot \epsilon_m^1 \cdot E_s} - \mu}$$

$$\beta_{bz} = \frac{N^1}{A_b (1 + n\mu)}; E_b = \frac{N^1}{A_b \cdot \epsilon_m^1 (1 + n\mu)}$$

Tabelle 4.5: Kennwerte und Spannungs-Dehnungslinien des Betonstahls

Kennwerte		Ø 10 mm	Ø 20 mm	Ø 28 mm
Durchmesser (Ist)	mm	10,1	20,0	28,0
Querschnitt (Ist)	mm ²	80,1	313,9	617,5
Streckgrenze	N/mm ²	467	469	465
Zugfestigkeit	N/mm ²	641	762	695
Elastizitätsmodul	kN/mm ²	201,4	195,7	197,2
Bruchdehnung	%	22,5	15,7	19,3
bezog. Rippenfläche	%	0,068	0,090	0,083

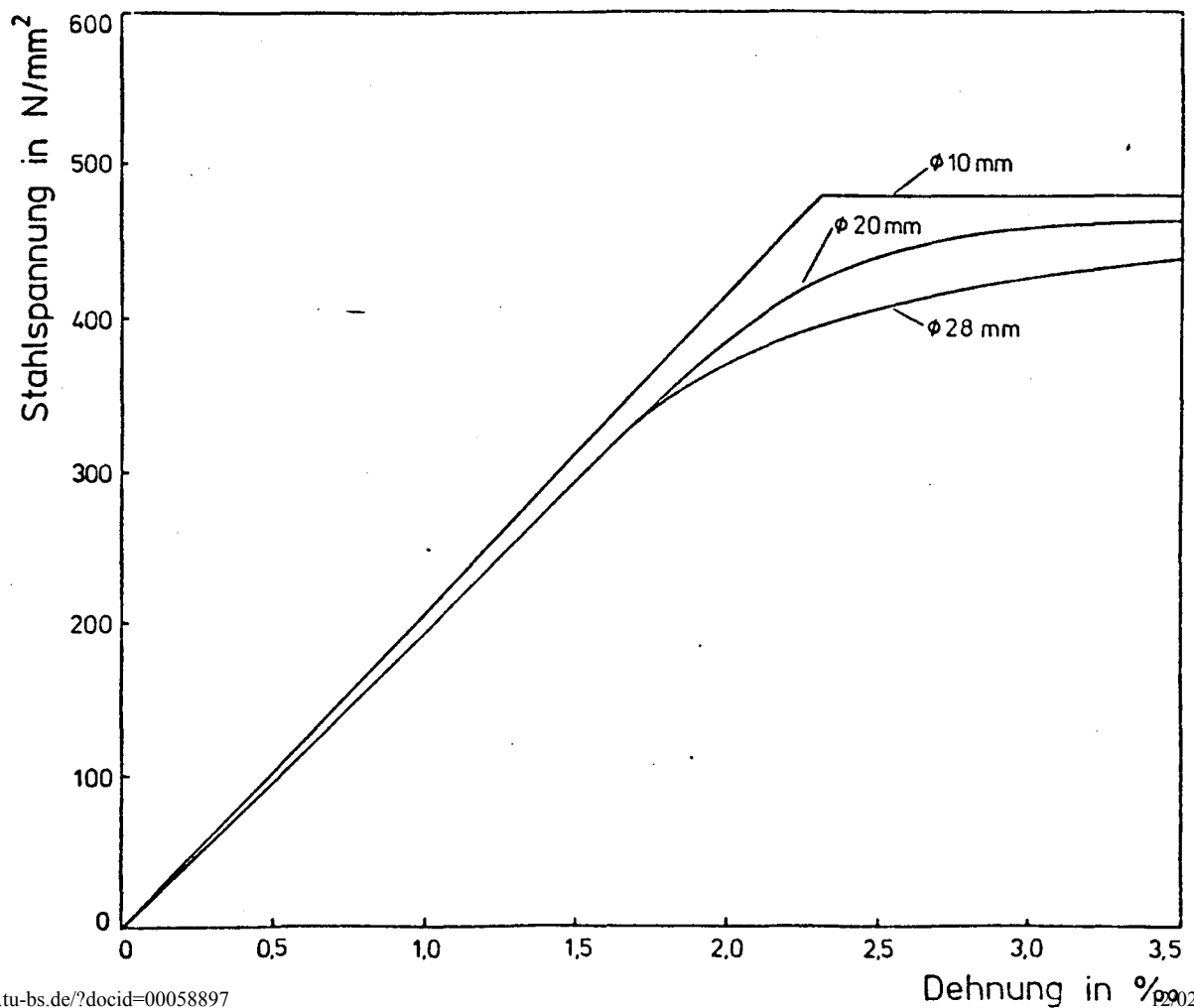


Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Meßgrößen des Versuchskörpers ZK 10/0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Laststufe	Normalkraft	Anzahl der Lastwechsel	bezogene Normalkraft	beanspruchungsgrad	mittlere Dünung	Anzahl der Risse auf den Meßlinien				mittlerer Rißabstand auf den Meßlinien				mittlere Rißbreite auf den Meßlinien				maximale Rißbreite an den Meßlinien		kritische Rißbreite
	N	n _L	$\frac{N}{A_s}$	$\frac{N - N^1}{N}$		1, 6 n _R	2, 5, 7, 10 n _R	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber. n _R	3, 4, 8, 9 = Mittenber. n _R	1, 6 s _{rm}	2, 5, 7, 10 s _{rm}	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber. s _{rm}	3, 4, 8, 9 = Mittenber. s _{rm}	1, 6 w _m	2, 5, 7, 10 w _m	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber. w _m	3, 4, 8, 9 = Mittenber. w _m	1, 6 w _{max}	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber. w _{max}	im Randbereich w _{max}
Nr.	kN	-	N/mm²	-	‰	-	-	-	-	cm	cm	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	207,0	-	161,5	0	0,130	0	0	0	9	-	-	-	111,1	-	-	-	0,006	-	-	-
2	232,0	-	181,0	0,100	0,300	0	7	7	17	-	142,9	214,3	58,8	-	0,038	0,038	0,156	-	0,052	0,079
3	282,0	-	220,0	0,266	0,720	0	21	21	28	-	47,6	71,4	35,7	-	0,043	0,043	0,245	-	0,060	0,080
4	315,0	-	245,8	0,343	0,835	2	27	29	29	250,0	37,0	51,7	34,5	0,030	0,049	0,047	0,290	0,030	0,093	0,088
5	357,0	-	278,6	0,420	1,180	2	37	39	31	250,0	27,0	38,5	32,3	0,059	0,066	0,066	0,346	0,059	0,134	0,122
6a	332,0	-	305,9	0,472	1,360	10	54	64	32	50,0	18,5	23,4	31,3	0,055	0,073	0,070	0,397	0,100	0,227	0,139
6b	161,0	-	125,6	-	-	-	54	-	-	-	18,5	-	-	-	0,038	-	-	-	-	-
7a	332,0	50	305,9	0,472	1,444	-	58	-	-	-	17,2	-	-	-	0,074	-	-	-	-	-
7b	161,0	50	125,6	-	0,840	-	58	-	-	-	17,2	-	-	-	0,036	-	-	-	-	-
8a	332,0	10 ³	305,9	0,472	1,468	-	74	-	-	-	13,5	-	-	-	0,067	-	-	-	-	-
8b	315,0	10 ³	245,8	0,343	1,201	-	74	-	-	-	13,5	-	-	-	0,057	-	-	-	-	-
9a	332,0	10 ⁴	305,9	0,472	1,466	-	75	-	-	-	13,3	-	-	-	0,069	-	-	-	-	-
9b	315,0	10 ⁴	245,8	0,343	1,276	-	75	-	-	-	13,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10a	332,0	10 ⁵	305,9	0,472	1,490	22	84	106	38	22,7	11,9	14,2	26,3	0,049	0,059	0,057	0,402	0,107	0,207	0,124
10b	315,0	10 ⁵	245,8	0,343	1,311	-	84	-	-	-	11,9	-	-	-	0,045	-	-	-	-	-
11	468,5	-	365,6	0,558	1,730	-	87	-	-	-	11,5	-	-	-	0,070	-	-	-	0,207	-
12	545,0	-	425,3	0,620	2,004	31	95	126	38	16,1	10,5	11,9	26,3	0,077	0,085	0,083	0,571	0,171	0,244	0,161

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Meßgrößen des Versuchskörpers ZK 10/1,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Laststufe	Normal- kraft	Anzahl der Lastwch- sel	bezogene Normalkraft	Beanspru- chungsgrad	mittlere Dehnung	Anzahl der Risse auf den Maßlinien				mittlerer Rißabstand auf den Maßlinien				mittlere Rißbreite auf den Maßlinien				maximale Rißbreite an den Maßlinien		kritische Rißbreite
						1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	im Randbereich
	N	n _L	$\frac{N}{A_s}$	$\frac{N - N^1}{N}$	‰	n _R	n _R	n _R	n _R	s _{rm}	s _{rm}	s _{rm}	s _{rm}	w _m	w _m	w _m	w _m	w _{max}	w _{max}	w _{max}
Nr.	kN	-	N/mm²	-	‰	-	-	-	-	cm	cm	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	207,0	-	161,5	0	0,456	9	23	32	13	55,6	43,5	46,9	76,9	0,027	0,044	0,039	0,222	0,030	0,100	0,004
2	232,0	-	181,0	0,108	0,628	15	36	51	18	33,3	27,8	29,4	55,6	0,036	0,048	0,044	0,245	0,050	0,119	0,001
3	282,0	-	220,0	0,266	0,951	44	75	119	42	11,9	13,3	12,6	23,8	0,044	0,060	0,054	0,201	0,095	0,146	0,000
4	315,0	-	245,8	0,343	1,082	64	118	182	46	7,8	8,5	8,2	21,7	0,048	0,061	0,056	0,219	0,118	0,170	0,106
5	357,0	-	298,6	0,420	1,270	64	123	187	50	7,8	8,1	8,0	20,0	0,059	0,072	0,067	0,239	0,147	0,189	0,123
6a	392,0	-	305,9	0,472	1,401	69	126	195	50	7,2	7,9	7,7	20,0	0,065	0,081	0,075	0,267	0,165	0,203	0,136
6b	161,0	-	125,6	-	0,738	-	126	-	-	-	7,9	-	-	-	0,035	-	-	-	-	-
7a	392,0	50	305,9	0,372	1,443	-	126	-	-	-	7,9	-	-	-	0,085	-	-	-	-	-
7b	161,0	50	125,6	-	0,751	-	126	-	-	-	7,9	-	-	-	0,035	-	-	-	-	-
8a	392,0	10³	305,9	0,472	1,450	-	130	-	-	-	7,7	-	-	-	0,035	-	-	-	-	-
8b	315,0	10³	245,8	0,343	1,244	-	130	-	-	-	7,7	-	-	-	0,034	-	-	-	-	-
9a	392,0	10⁴	305,9	0,472	1,460	-	132	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9b	315,0	10⁴	245,8	0,343	1,250	-	132	-	-	-	7,6	-	-	-	0,034	-	-	-	-	-
10a	392,0	10⁵	305,9	0,472	1,475	73	133	206	51	6,8	7,5	7,3	19,6	0,072	0,085	0,081	0,283	0,188	0,216	0,148
10b	315,0	10⁵	245,8	0,343	1,259	-	133	-	-	-	7,5	-	-	-	0,072	-	-	-	-	-
11	468,5	-	365,6	0,558	1,744	-	140	-	-	-	7,1	-	-	-	0,101	-	-	-	0,250	-
12	545,0	-	425,3	0,620	2,115	79	145	224	54	6,3	6,9	6,7	18,5	0,106	0,123	0,117	0,387	0,278	0,343	0,220

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Meßgrößen des Versuchskörpers ZK 10/1,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Laststufe	Normalkraft	Anzahl der Lastwechsel	bezogene Normalkraft	Beanspruchungsgrad	mittlere Dühnung	Anzahl der Risse auf den Meßlinien				mittlerer Rißabstand auf den Meßlinien				mittlere Rißbreite auf den Meßlinien				maximale Rißbreite an den Meßlinien		kritische Rißbreite
						1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	im Randbereich
	N	n_L	$\frac{N}{A_s}$	$\frac{N - N^1}{N}$		n_R	n_R	n_R	n_R	s_{rm}	s_{rm}	s_{rm}	s_{rm}	w_m	w_m	w_m	w_m	w_{max}	w_{max}	w_{max}
Nr.	kN	-	N/mm ²	-	‰	-	-	-	-	cm	cm	cm	cm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm
1	207,0	-	161,5	0	0,456	9	23	32	13	55,6	43,5	46,9	76,9	0,027	0,044	0,039	0,222	0,030	0,100	0,084
2	232,0	-	181,0	0,108	0,628	15	36	51	18	33,3	27,8	29,4	55,6	0,036	0,048	0,044	0,245	0,050	0,119	0,061
3	282,0	-	220,0	0,266	0,951	44	75	119	42	11,9	13,3	12,6	23,8	0,044	0,060	0,064	0,201	0,095	0,146	0,090
4	315,0	-	245,8	0,343	1,002	64	118	182	46	7,8	8,5	8,2	21,7	0,048	0,061	0,066	0,219	0,118	0,170	0,106
5	357,0	-	298,6	0,420	1,270	64	123	187	50	7,8	8,1	8,0	20,0	0,059	0,072	0,067	0,239	0,147	0,169	0,123
6a	392,0	-	305,9	0,472	1,401	69	126	195	50	7,2	7,9	7,7	20,0	0,065	0,081	0,075	0,267	0,165	0,203	0,136
6b	161,0	-	125,6	-	0,738	-	126	-	-	-	7,9	-	-	-	0,035	-	-	-	-	-
7a	392,0	50	305,9	0,372	1,443	-	126	-	-	-	7,9	-	-	-	0,035	-	-	-	-	-
7b	161,0	50	125,6	-	0,751	-	126	-	-	-	7,9	-	-	-	0,035	-	-	-	-	-
8a	392,0	10 ³	305,9	0,472	1,450	-	130	-	-	-	7,7	-	-	-	0,034	-	-	-	-	-
8b	315,0	10 ³	245,8	0,343	1,244	-	130	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9a	392,0	10 ⁴	305,9	0,472	1,460	-	132	-	-	-	7,6	-	-	-	0,034	-	-	-	-	-
9b	315,0	10 ⁴	245,8	0,343	1,250	-	132	-	-	-	7,6	-	-	-	0,071	-	-	-	-	-
10a	392,0	10 ⁵	305,9	0,472	1,475	73	133	206	51	6,8	7,5	7,3	19,6	0,072	0,085	0,081	0,283	0,188	0,216	0,148
10b	315,0	10 ⁵	245,8	0,343	1,259	-	133	-	-	-	7,5	-	-	-	0,072	-	-	-	-	-
11	468,5	-	365,6	0,558	1,744	-	140	-	-	-	7,1	-	-	-	0,101	-	-	-	0,250	-
12	545,0	-	425,3	0,620	2,115	79	145	224	54	6,3	6,9	6,7	18,5	0,106	0,123	0,117	0,387	0,278	0,343	0,220

Tabelle 6.3: Zusammenstellung der Meßgrößen des Versuchskörpers ZK 20/0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Laststufe	Nominalkraft	Anzahl der Lastwechsel	bezogene Nominalkraft	Beanspruchungsgrad	mittlere Dehnung	Anzahl der Risse auf den Mußlinien				mittlerer Rißabstand auf den Mußlinien				mittlere Rißbreite auf den Mußlinien				maximale Rißbreite an den Mußlinien		kritische Rißbreite
						1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	im Randbereich
	N	n _L	$\frac{N}{A_s}$	$\frac{N - N^I}{N}$	‰	n _R	n _R	n _R	n _R	s _{rm}	s _{rm}	s _{rm}	s _{rm}	w _m	w _m	w _m	w _m	w _{max}	w _{max}	w _{max}
Nr.	kN	-	N/mm²	-	‰	-	-	-	-	cm	cm	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	190,0	-	151,3	0	0,466	18	32	50	15	27,8	31,3	30,0	66,7	0,064	0,092	0,092	0,240	0,150	0,320	0,214
2	215,0	-	171,2	0,116	0,817	28	56	84	34	17,9	17,9	17,9	29,4	0,095	0,103	0,100	0,196	0,176	0,351	0,227
3	240,0	-	191,1	0,200	0,922	32	61	93	37	15,6	16,4	16,1	27,0	0,104	0,113	0,110	0,213	0,224	0,377	0,251
4	290,0	-	231,0	0,345	1,156	39	77	116	48	12,8	13,0	12,9	20,8	0,121	0,122	0,122	0,235	0,235	0,410	0,294
5	323,0	-	257,2	0,412	1,205	39	80	119	48	12,8	12,5	12,6	20,8	0,137	0,135	0,136	0,266	0,270	0,434	0,313
6	366,0	-	290,7	0,479	1,492	41	82	123	49	12,2	12,2	12,2	20,4	0,158	0,154	0,156	0,309	0,330	0,502	0,350
7a	400,0	-	318,6	0,525	1,636	41	83	-	-	12,2	12,0	12,1	19,6	0,176	0,170	0,172	0,337	0,369	0,555	0,392
7b	169,0	-	134,6	-	0,910	-	83	-	-	-	12,0	-	-	-	0,088	-	-	-	-	-
8a	400,0	50	318,6	0,525	1,693	-	86	-	-	-	11,6	-	-	-	0,171	-	-	-	-	-
8b	169,0	50	134,6	-	0,929	-	86	-	-	-	11,6	-	-	-	0,083	-	-	-	-	-
9a	400,0	10³	318,6	0,525	1,707	-	87	-	-	-	11,5	-	-	-	0,167	-	-	-	-	-
9b	323,0	10³	257,2	0,412	1,467	-	87	-	-	-	11,5	-	-	-	0,140	-	-	-	-	-
10a	400,0	10⁵	318,6	0,525	1,752	42	89	131	52	11,9	11,2	11,5	19,2	0,186	0,173	0,177	0,348	0,417	0,462	0,406
10b	323,0	-	257,2	0,412	1,508	-	89	-	-	-	11,2	-	-	-	0,143	-	-	-	-	-
11	476,5	-	379,5	0,601	2,048	42	92	134	53	11,9	10,9	11,2	18,9	0,227	0,199	0,207	0,411	0,470	0,704	0,471
12	553,0	-	440,4	0,666	2,735	44	105	149	59	11,4	9,5	10,1	16,9	0,296	0,243	0,259	0,496	0,606	0,966	0,629

Tabelle 6.4: Zusammenstellung der Meßgrößen des Versuchskörpers ZK 20/1,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Laststufe	Normalkraft	Anzahl der Lastwechsel	bezogene Normalkraft	Beanspruchungsgrad	mittlere Dehnung	Anzahl der Risse auf den Meßlinien				mittlerer Rißabstand auf den Meßlinien				mittlere Rißbreite auf den Meßlinien				maximale Rißbreite an den Meßlinien		kritische Rißbreite
						1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	im Randbereich
	N	n _L	$\frac{N}{A_0}$	$\frac{N - N^I}{N}$		n _R	n _R	n _R		s _{rm}	s _{rm}	s _{rm}	s _{rm}	w _m	w _m	w _m	w _m	w _{max}	w _{max}	w _{max}
Nr.	kN	-	N/mm²	-	‰	-	-	-	-	cm	cm	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	162,0	-	145,0	0	0,072	0	5	5	2	-	200,0	300,0	500,0	0	0,032	0,032	0,050	-	0,050	0,086
2	207,0	-	164,9	0,121	0,141	0	9	9	4	-	111,1	166,7	250,0	0	0,040	0,040	0,098	-	0,070	0,091
3	232,0	-	184,8	0,216	0,419	4	25	29	14	125,0	40,0	51,7	71,4	0,035	0,050	0,048	0,183	0,050	0,120	0,108
4	282,0	-	224,6	0,355	0,783	29	55	84	30	17,2	18,2	17,9	33,3	0,048	0,065	0,060	0,210	0,100	0,170	0,127
5	315,0	-	250,9	0,422	0,936	36	71	107	40	13,9	14,1	14,0	25,0	0,058	0,072	0,067	0,210	0,155	0,200	0,145
6	357,0	-	284,3	0,490	1,131	43	80	123	43	11,6	12,5	12,2	23,3	0,067	0,085	0,079	0,245	0,202	0,241	0,171
7a	392,0	-	312,2	0,536	1,249	49	83	132	46	10,2	12,0	11,4	21,7	0,078	0,100	0,092	0,274	0,235	0,320	0,193
7b	161,0	-	128,2	-	0,712	-	83	-	-	-	12,0	-	-	-	0,050	-	-	-	-	-
8a	392,0	50	312,2	0,536	1,362	-	89	-	-	-	11,2	-	-	-	0,105	-	-	-	-	-
8b	161,0	50	128,2	-	0,741	-	89	-	-	-	11,2	-	-	-	0,049	-	-	-	-	-
9a	392,0	10 ³	312,2	0,536	1,387	-	91	-	-	-	11,0	-	-	-	0,104	-	-	-	-	-
9b	315,0	10 ³	250,9	0,422	1,224	-	91	-	-	-	11,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10a	392,0	10 ⁴	312,2	0,536	1,391	-	91	-	-	-	11,0	-	-	-	0,107	-	-	-	-	-
10b	315,0	10 ⁴	250,9	0,422	1,223	-	91	-	-	-	11,0	-	-	-	0,092	-	-	-	-	-
11a	392,0	10 ⁵	312,2	0,536	1,401	54	92	146	48	9,3	10,9	10,3	20,8	0,086	0,109	0,100	0,297	0,295	0,380	0,236
11b	365,0	10 ⁵	250,9	0,422	1,237	-	92	-	-	-	10,9	-	-	-	0,099	-	-	-	-	-
12	468,5	-	373,1	0,612	1,675	54	95	149	51	9,3	10,5	10,1	19,6	0,108	0,133	0,124	0,338	0,349	0,520	0,291
13	545,0	-	434,1	0,666	2,052	56	96	152	56	8,9	10,4	9,9	17,9	0,134	0,169	0,156	0,387	0,438	0,780	0,370

Tabelle 6.5: Zusammenstellung der Meßgrößen des Versuchskörpers ZK 28/1,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Laststufe	Normal- kraft	Anzahl der Lastwechsel	bezogene Normalkraft	Beanspru- chungsgrad	mittlere Dehnung	Anzahl der Risse auf den Mußlinien				mittlerer Rißabstand auf den Mußlinien				mittlere Rißbreite auf den Mußlinien				maximale Rißbreite an den Mußlinien		kritische Rißbreite
						1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	2, 5, 7, 10	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	3, 4, 8, 9 = Mittenber.	1, 6	1, 2, 5, 6 7, 10 = Randber.	an der Mußlinie
	N	n_L	$\frac{N}{A_S}$	$\frac{N - N^1}{N}$		n_R	n_R	n_R	n_R	s_{rm}	s_{rm}	s_{rm}	s_{rm}	w_m	w_m	w_m	w_m	w_{max}	w_{max}	w_{max}
Nr.	kN	-	N/mm ²	-	‰	-	-	-	-	cm	cm	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	157,0	-	127,1	0	0,141	3	2	5	2	166,7	500,0	300,0	500,0	0,047	0,250	0,128	0,260	0,050	0,300	-
2	182,0	-	147,4	0,137	0,284	7	6	13	4	71,4	166,7	115,4	250,0	0,051	0,271	0,152	0,395	0,000	0,400	0,123
3	207,0	-	167,6	0,242	0,323	8	7	15	4	62,5	142,9	100,0	250,0	0,056	0,287	0,164	0,487	0,101	0,573	0,253
4	232,0	-	187,9	0,323	0,589	17	14	31	16	29,4	71,4	48,4	62,5	0,061	0,272	0,156	0,266	0,174	0,641	0,158
5	282,0	-	228,3	0,443	0,800	36	27	63	27	13,9	37,0	23,8	37,0	0,071	0,241	0,144	0,308	0,245	0,500	0,166
6	315,0	-	255,1	0,502	1,088	45	30	75	31	11,1	33,3	20,0	32,3	0,076	0,266	0,152	0,341	0,293	0,657	0,175
7	357,0	-	289,1	0,560	1,275	47	31	78	33	10,6	32,3	19,2	30,3	0,091	0,312	0,179	0,395	0,342	0,730	0,206
8a	392,0	-	317,4	0,599	1,420	47	33	80	36	10,6	30,3	18,8	27,8	0,104	0,341	0,208	0,415	0,384	0,785	0,234
8b	161,0	-	130,4	-	0,862	47	33	80	-	10,6	30,3	18,8	-	0,056	0,178	0,106	-	-	-	-
9a	392,0	50	317,4	0,599	1,490	52	34	86	-	9,6	29,4	17,4	-	0,104	0,361	0,206	-	-	-	-
9b	161,0	50	130,4	-	0,836	52	34	86	-	9,6	29,4	17,4	-	0,063	0,175	0,102	-	-	-	-
9c	315,0	50	255,1	0,502	1,304	52	34	86	-	9,6	29,4	17,4	-	0,099	0,308	0,176	-	-	-	-
10a	392,0	10 ³	317,4	0,599	1,511	52	34	86	-	9,6	29,4	17,4	-	0,106	0,370	0,210	-	-	-	-
10b	315,0	10 ³	255,1	0,502	1,332	52	34	86	-	9,6	29,4	17,4	-	0,093	0,321	0,183	-	-	-	-
11	392,0	10 ⁴	317,4	0,599	1,520	54	34	88	-	9,3	29,4	17,0	-	0,109	0,382	0,214	-	-	-	-
12a	392,0	10 ⁵	317,4	0,599	1,579	57	36	93	38	8,8	27,8	16,1	26,3	0,107	0,379	0,212	0,465	0,462	0,806	0,271
12b	315,0	10 ⁵	255,1	0,502	1,376	57	36	93	-	8,8	27,8	16,1	-	0,094	0,330	0,185	-	-	-	-
13	468,5	-	379,4	0,665	1,748	58	36	94	39	8,6	27,8	16,0	25,6	0,127	0,447	0,250	0,537	0,543	1,015	0,318
14	545,0	-	441,3	0,712	2,242	61	37	98	41	8,2	27,0	15,3	24,4	0,161	0,581	0,320	0,684	0,854	1,549	0,441

Tabelle 6.6: Rechnerische Ermittlung der Normalkraft-Dehnungs-
linie, Versuchskörper Zk 10/0

$$k_4 = \mu \cdot \sqrt{\Delta \epsilon^{\text{Vers.}} \cdot E_S \cdot \sigma_{SR}}, \quad E_S = 201,4 \text{ kN/mm}^2$$

$$\epsilon_m^{k_4} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{\bar{k}_4^2}{\mu^2} \cdot \frac{1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \mu_S = 1,02 \%$$

$$\epsilon_m^{\text{Rao}} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{\beta_{DZ}^{N^1}}{\mu} \cdot \frac{\sigma_{SR}^1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \beta_{DZ}^{N^1} = 1,52 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{SR}^1 = 161,5 \text{ N/mm}^2$$

Last= stufe	Normal- kraft N	σ_{SR} = N/A _S	$\Delta \epsilon$	k_4	rechn $\epsilon_m^{k_4}$	rechn ϵ_m^{Rao}
-	kN	N/mm ²		N/mm ²		
1	207,0	161,5	0,742	1,59	0,111	0,058
2	232,0	181,0	0,462	1,32	0,283	0,239
3	282,0	220,0	0,342	1,25	0,586	0,550
4	315,0	245,8	0,377	1,39	0,770	0,737
5	357,0	278,6	0,387	1,50	0,987	0,959
6 a	392,0	305,9	0,387	1,57	1,157	1,131
11	468,5	365,6	0,427	1,81	1,516	1,494
12	545,0	425,3	0,417	1,93	1,851	1,833
				$\bar{k}_4=1,54$		

Tabelle 6.7: Rechnerische Ermittlung der Normalkraft-Dehnungs-
linie, Versuchskörper Zk 10/1,5

$$k_4 = \mu \cdot \sqrt{\Delta \epsilon^{\text{Vers}} \cdot E_S \cdot \sigma_{SR}}, \quad E_S = 201,4 \text{ kN/mm}^2$$

$$\epsilon_m^{k_4} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{\bar{k}_4^2}{\mu^2} \cdot \frac{1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \mu = 1,02 \%$$

$$\epsilon_m^{\text{Rao}} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{\beta_{DZ}^1}{\mu} \cdot \frac{\sigma_{SR}^1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \beta_{DZ}^1 = 1,50 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{SR}^1 = 161,5 \text{ N/mm}^2$$

Last- stufe	Normal- kraft N	σ_{SR} = N/A _S	$\Delta \epsilon$	k_4	rechn $\epsilon_m^{k_4}$	rechn ϵ_m^{Rao}
-	kN	N/mm ²	‰	N/mm ²	‰	‰
1	207,0	161,5	0,735	1,58	0,006	0,070
2	232,0	181,0	0,755	1,69	0,173	0,236
3	282,0	220,0	0,520	1,55	0,496	0,548
4	315,0	245,8	0,515	1,63	0,689	0,735
5	357,0	278,6	0,500	1,71	0,916	0,957
6 a	392,0	305,9	0,400	1,60	1,092	1,130
11	468,5	365,6	0,335	1,60	1,461	1,493
12	545,0	425,3	0,415	1,92	1,805	1,832
				$\bar{k}_4 = 1,66$		

Tabelle 6.8: Rechnerische Ermittlung der Normalkraft-Dehnungs-
linie, Versuchskörper Zk 20/0

$$k_4 = \mu \cdot \sqrt{\Delta \varepsilon_{\text{Vers}} \cdot E_S \cdot \sigma_{SR}}, \quad E_S = 195,7 \text{ kN/mm}^2$$

$$\varepsilon_m^{k_4} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{k_4}{\mu^2} \cdot \frac{1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \mu = 1,00 \%$$

$$\varepsilon_m^{\text{Rao}} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{\beta_{DZ}^{N1}}{\mu} \cdot \frac{\sigma_{SR}^1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \beta_{DZ}^{N1} = 1,42 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{SR}^1 = 151,3 \text{ N/mm}^2$$

Last= stufe	Normal- kraft N	σ_{SR} = N/A _S	$\Delta \varepsilon$	k_4	rechn $\varepsilon_m^{k_4}$	rechn $\varepsilon_m^{\text{Rao}}$
-	kN	N/mm ²	‰	N/mm ²	‰	‰
1	190,0	151,3	0,725	1,47	0,295	0,046
2	215,0	171,2	0,400	1,16	0,451	0,243
3	240,0	191,1	0,215	0,90	0,597	0,411
4	290,0	231,0	0,195	0,94	0,867	0,713
5	323,0	257,2	0,230	1,08	0,893	1,032
6	290,7		0,225	1,13	1,238	1,116
7 a	318,6		0,245	1,24	1,403	1,292
11	379,5		0,230	(1,31) ¹	1,746	1,652
12	440,4		0,260	(1,50) ¹	2,084	,003
				$\bar{k}_4 = 1,19$		

¹⁾ $E_S < 195,7 \text{ kN/mm}^2$; Werte bleiben bei der Mittelwertbildung unberücksichtigt.

Tabelle 6.9: Rechnerische Ermittlung der Normalkraft-Dehnungs-
linie, Versuchskörper Zk 20/1,5

$$k_4 = \mu \cdot \sqrt{\Delta \epsilon^{\text{Vers}} \cdot E_S \cdot \sigma_{SR}}, \quad E_S = 195,7 \text{ kN/mm}^2$$

$$\epsilon_m^{k_4} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{k_4^2}{\mu^2} \cdot \frac{1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \mu = 1,00 \%$$

$$\epsilon_m^{\text{Rao}} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{\beta_{bZ}^{N1}}{\mu} \cdot \frac{\sigma_{SR}^1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \beta_{bZ}^{N1} = 1,34 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{SR}^1 = 145,0 \text{ N/mm}^2$$

Last= stufe	Normal- kraft N	σ_{SR} = N/A _S	$\Delta \epsilon$	k_4	rechn $\epsilon_m^{k_4}$	rechn ϵ_m^{Rao}
-	kN	N/mm ²	‰	N/mm ²	‰	‰
1	182,0	145,0	0,675	1,39	-0,257	0,052
2	207,0	164,9	0,750	1,56	-0,034	0,243
3	232,0	184,8	0,820	1,72	0,163	0,410
4	282,0	224,6	0,550	1,56	0,506	0,709
5	315,0	250,9	0,590	1,70	0,706	0,888
6	357,0	284,3	0,615	1,86	0,955	1,115
7 a	392,0	312,2	0,650	1,99	1,130	1,277
12	468,5	373,1	0,715	(2,29) ¹	1,518	1,640
13	545,0	434,1	0,850	(2,69) ¹	1,884	1,989
				$\bar{k}_4 = 1,68$		

1) $E_S < 195,7 \text{ kN/mm}^2$; Werte bleiben bei der Mittelwertbildung unberücksichtigt.

Tabelle 6.10: Rechnerische Ermittlung der Normalkraft-Dehnungs-
linie, Versuchskörper Zk 28/1,5

$$k_4 = \mu \cdot \sqrt{\Delta \varepsilon^{\text{Vers}} \cdot E_S \cdot \sigma_{SR}}, \quad E_S = 195,7 \text{ kN/mm}^2$$

$$\varepsilon_m^{k_4} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{\bar{k}_4^2}{\mu^2} \cdot \frac{1}{\sigma_{SR}} \right), \quad \mu = 1,00 \%$$

$$\varepsilon_m^{\text{Rao}} = \frac{1}{E_S} \left(\sigma_{SR} - \frac{B_{DZ}^1}{\mu} \cdot \frac{\sigma_{SR}^1}{\sigma_{SR}} \right), \quad B_{DZ}^1 = 1,16 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{SR}^1 = 127,1 \text{ N/mm}^2$$

Last- stufe	Normal- kraft N	σ_{SR} = N/A _S	$\Delta \varepsilon$	k_4	rechn $\varepsilon_m^{k_4}$	rechn $\varepsilon_m^{\text{Rao}}$
-	kN	N/mm ²	‰	N/mm ²	‰	‰
1	157,0	127,1	0,600	1,20	-0,263	0,044
2	182,0	147,4	0,600	1,29	-0,035	0,230
3	207,0	167,6	0,550	1,32	0,162	0,395
4	232,0	187,9	0,630	1,50	0,339	0,547
5	282,0	228,3	0,510	1,48	0,652	0,824
6	315,0	255,1	0,465	1,50	0,841	0,995
7	357,0	289,1	0,520	1,69	1,067	1,202
8 a	392,0	317,4	0,565	1,84	1,246	1,369
13	468,5	379,4	0,650	(2,16) ¹	1,620	1,723
14	545,0	441,3	1,600	(3,66) ¹	1,976	2,065
				$\bar{k}_4 = 1,48$		

1) $E_S < 197,2 \text{ kN/mm}^2$; Werte bleiben bei der Mittelwertbildung unberücksichtigt.

Tabelle 6.11: Differenzstrecklasten, Restzugspannungen

$$\beta_{bZ,Rest} = \Delta N / A_{b,FB}$$

$$A_{b,FB} = 2 \times 200 \times 100 \text{ mm}^2 = 40.000 \text{ mm}^2 \text{ (Faserbetonquerschnittsfläche)}$$

Versuchs= körper	1	2	3	4=2-3	5	6
	ϵ_m	N_{ZK}	N_{Stahl}	Differenz- strecklast ΔN	Restzug= spannung $\beta_{bZ,Rest}$	$\frac{\beta_{bZ,Rest}}{\beta_{bZ,Zyl.}}$
	o/oo	kN	kN	kN	N/mm ²	
ZK 10/0	2,5	598	598,5	-0,5	-0,01	0
ZK 10/1,5	2,5	640	598,5	41,5	1,04	0,69
ZK 20/0	4,1	591	587	4,0	0,10	0
ZK 20/1,5	4,1	656	587	69,0	1,72	0,91
ZK 28/1,5	3,7	608	560	48,0	1,20	0,53

Tabelle 6.12: Endrißabstand $s_{rm,e}$

Rehm/Martin: $s_{rm,e} = k_1 \cdot c_b + k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{d_s}{\mu_{eff}}$

CEB 78 MC : $s_{rm,e} = 2 \left(c_b + \frac{s}{10} \right) + \chi_1 \cdot \chi_2 \cdot \frac{d_s}{\mu_{eff}}$

Versuchs= körper	d_s	μ	b_{eff}	μ_{eff}	$\frac{d_s}{\mu_{eff}}$	c_b	s	k_2	R/M $s_{rm,e}$	CEB $s_{rm,e}$	Vers. 1) $s_{rm,e}$
	mm	o/oo	cm	o/oo	cm	cm	cm	-	cm	cm	cm
ZK 10/0	10	1,02	15,0	2,14	46,7	2,0	5,0	0,025	8,7	9,7	8,1
ZK 10/1,5	10	1,02	15,0	2,14	46,7	2,0	5,0	0,025	8,7	9,7	-
ZK 20/0	20	1,00	20,0	1,57	127,4	4,0	10,0	0,022	20,0	22,7	14,3
ZK 20/1,5	20	1,00	20,0	1,57	127,4	4,0	10,0	0,022	20,0	22,7	17,9
ZK 28/1,5	28	0,98	26,0	1,19	235,9	8,6 ²⁾	20,0	0,023	40,1 ²⁾	44,9 ²⁾	35,7 ²⁾

1) Abstand der die effektive Betonzugzone vollständig durchtrennenden Risse

2) Rißabstand auf den Meßlinien 2,5,7,10

Tabelle 6.13: Verhältnis der kritischen Rißbreite w_{95}
zur mittleren Rißbreite w_m

Versuchs= körper	mittleres Verhältnis w_{95}/w_m	mittleres Verhältnis w_{95}/w_m	
ZK 10/0	1,938	2,130	
ZK 20/0	2,322		
ZK 10/1,5	2,064	2,175	2,278
ZK 20/1,5	2,286		
ZK 28/1,5	2,485		

Tabelle 6.14 : rechnerische und gemessene Dehnsteifigkeit,
Versuchskörper ZK 10/0

$$\begin{aligned} \text{gem } K_D &= \frac{N}{\epsilon_{m,0}^{1)}} ; & \text{gem } k_D &= \frac{\text{gem } K_D}{K_{Di}} \\ \text{rechn } K_D &= E_s \cdot A \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_{sR}}{\sigma_{sR}^1} \right)^2} & k_D &= \frac{\text{rechn } K_D}{K_{Di}} \\ K_{Di} &= E_b \cdot A_i = E_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + n\mu}{n\mu} = 3,557 \cdot 10^6 \text{ kN} \\ k_{Ds} &= \frac{E_s \cdot A_s}{K_{Di}} = 0,073 \text{ (reiner Zustand II)} \end{aligned}$$

Laststufe	Normal= kraft kN	σ_{sR} N/mm ²	$\epsilon_{m,0}^{1)}$ o/oo	gem K_D · 10 ⁶ kN	gem k_D —	rechn. k_D —
1	207,0	161,5	0,058	3,569	1,003	—
2	232,0	181,0	0,430	0,501	0,141	0,356
3	282,0	220,0	0,826	0,341	0,096	0,157
4	315,0	245,8	1,042	0,302	0,085	0,128
5	357,0	278,6	1,215	0,294	0,083	0,109
6a	392,0	305,9	1,371	0,286	0,080	0,101
11	468,5	365,6	1,719	0,273	0,077	0,090
12	545,0	425,3	2,045	0,267	0,075	0,085

$\epsilon_{m,0}$: Dehnung unmittelbar vor der Rißbildung bei der
betreffenden Laststufe

Tabelle 6.15 : rechnerische und gemessene Dehnsteifigkeit,
Versuchskörper ZK 10/1,5

$$\begin{aligned} \text{gem } K_D &= \frac{N}{\epsilon_{m,0}^{''}} ; & \text{gem } k_D &= \frac{\text{gem } K_D}{K_{Di}} \\ \text{rechn } K_D &= E_s \cdot A \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_{sR}}{\sigma_{sR}^1} \right)^2} & k_D &= \frac{\text{rechn } K_D}{K_{Di}} \\ K_{Di} &= \frac{E_b \cdot A_i}{E_s \cdot A_s} = E_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + n\mu}{n\mu} = 2,947 \cdot 10^6 \text{ kN} \\ k_{Ds} &= \frac{E_s \cdot A_s}{K_{Di}} = 0,088 \text{ (reiner Zustand II)} \end{aligned}$$

Laststufe	Normal= kraft kN	σ_{sR} N/mm ²	$\epsilon_{m,0}^{''}$ o/oo	gem K_D $\cdot 10^6$ kN	gem k_D —	rechn. k_D —
1	207,0	161,5	0,070	2,957	1,003	—
2	232,0	181,0	0,115	2,017	0,684	0,430
3	282,0	220,0	0,600	0,470	0,159	0,190
4	315,0	245,8	0,810	0,389	0,132	0,154
5	357,0	278,6	1,065	0,335	0,114	0,132
6a	392,0	305,9	1,275	0,307	0,104	0,121
11	468,5	365,6	1,710	0,274	0,093	0,109
12	545,0	425,3	1,944	0,280	0,095	0,102

$\epsilon_{m,0}$: Dehnung unmittelbar vor der Rißbildung bei der
betreffenden Laststufe

Tabelle 6.16 : rechnerische und gemessene Dehnsteifigkeit,
Versuchskörper ZK 20/0

$$\begin{aligned} \text{gem } K_D &= \frac{N}{\epsilon_{m,0}^{11}} ; & \text{gem } k_D &= \frac{\text{gem } K_D}{K_{Di}} \\ \text{rechn } K_D &= E_s \cdot A \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_{SR}}{\sigma_{SR}} \right)^2} & k_D &= \frac{\text{rechn } K_D}{K_{Di}} \\ K_{Di} &= E_b \cdot A_i = E_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + n\mu}{n\mu} = 3,487 \cdot 10^6 \text{ kN} \\ k_{Ds} &= \frac{E_s \cdot A_s}{K_{Di}} = 0,070 \text{ (reiner Zustand II)} \end{aligned}$$

Laststufe	Normal= kraft kN	σ_{SR} N/mm ²	$\epsilon_{m,0}^{11}$ o/oo	gem K_D · 10 ⁶ kN	gem k_D —	rechn. k_D —
1	190,0	151,3	0,046	4,130	1,004	—
2	215,0	171,2	0,537	0,400	0,097	0,273
3	240,0	191,1	0,892	0,269	0,065	0,160
4	290,0	231,0	1,101	0,263	0,064	0,105
5	323,0	257,2	1,235	0,262	0,064	0,091
6	365,0	290,7	1,452	0,251	0,061	0,082
7a	400,0	318,6	1,636	0,244	0,059	0,077
11	476,5	379,5	2,013	0,237	0,058	0,071
12	553,0	440,4	2,490	0,222	0,054	0,068

$\epsilon_{m,0}$: Dehnung unmittelbar vor der Rißbildung bei der betreffenden Laststufe

Tabelle 6.17 : rechnerische und gemessene Dehnsteifigkeit,
Versuchskörper ZK 20/1,5

$$\begin{aligned} \text{gem } K_D &= \frac{N}{\epsilon_{m,0}^{11}} ; & \text{gem } k_D &= \frac{\text{gem } K_D}{K_{Di}} \\ \text{rechn } K_D &= E_s \cdot A \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_{SR}}{\sigma_{SR}^1} \right)^2} & k_D &= \frac{\text{rechn } K_D}{K_{Di}} \\ K_{Di} &= E_b \cdot A_i = E_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + n\mu}{n\mu} = 3,487 \cdot 10^6 \text{ kN} \\ k_{Ds} &= \frac{E_s \cdot A_s}{K_{Di}} = 0,070 \quad (\text{reiner Zustand II}) \end{aligned}$$

Laststufe	Normal= kraft kN	σ_{SR} N/mm ²	$\epsilon_{m,0}^{11}$ o/oo	gem K_D · 10 ⁶ kN	gem k_D —	rechn. k_D —
1	182,0	145,0	0,052	3,500	1,004	—
2	207,0	164,9	0,116	1,784	0,512	0,311
3	232,0	184,8	0,194	1,196	0,343	0,183
4	282,0	224,6	0,668	0,422	0,121	0,120
5	315,0	250,9	0,851	0,370	0,106	0,106
6	357,0	284,3	1,036	0,345	0,099	0,095
7a	392,0	312,2	1,164	0,337	0,097	0,090
12	468,5	373,1	1,625	0,288	0,083	0,083
13	545,0	434,1	1,967	0,277	0,075	0,079

$\epsilon_{m,0}$: Dehnung unmittelbar vor der Rißbildung bei der
betreffenden Laststufe

Tabelle 6.18 : rechnerische und gemessene Dehnsteifigkeit,
Versuchskörper ZK 28/1,5

$$\begin{aligned} \text{gem } K_D &= \frac{N}{\epsilon_{m,0}^{11}} ; & \text{gem } k_D &= \frac{\text{gem } K_D}{K_{Di}} \\ \text{rechn } K_D &= E_s \cdot A \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_{sR}}{\sigma_{sR}^1} \right)^2} & k_D &= \frac{\text{rechn } K_D}{K_{Di}} \\ K_{Di} &= E_b \cdot A_i = E_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + n\mu}{n\mu} = 3,570 \cdot 10^6 \text{ kN} \\ k_{Ds} &= \frac{E_s \cdot A_s}{K_{Di}} = 0,068 \quad (\text{reiner Zustand II}) \end{aligned}$$

Laststufe	Normal= kraft kN	σ_{sR} N/mm ²	$\epsilon_{m,0}^{11}$ o/oo	gem K_D · 10 ⁶ kN	gem k_D —	rechn. k_D —
1	157,0	127,1	0,044	3,568	0,999	—
2	182,0	14-,4	0,189	0,963	0,270	0,266
3	207,0	167,6	0,313	0,661	0,185	0,161
4	232,0	187,9	0,339	0,684	0,192	0,126
5	282,0	228,3	0,743	0,380	0,106	0,099
6	315,0	255,1	1,033	0,305	0,085	0,091
7	357,0	289,1	1,185	0,301	0,084	0,085
8a	392,0	317,4	1,335	0,294	0,082	0,081
13	468,5	379,4	1,738	0,270	0,076	0,077
14	545,0	441,3	2,017	0,270	0,076	0,074

$\epsilon_{m,0}$: Dehnung unmittelbar vor der Rißbildung bei der betreffenden Laststufe

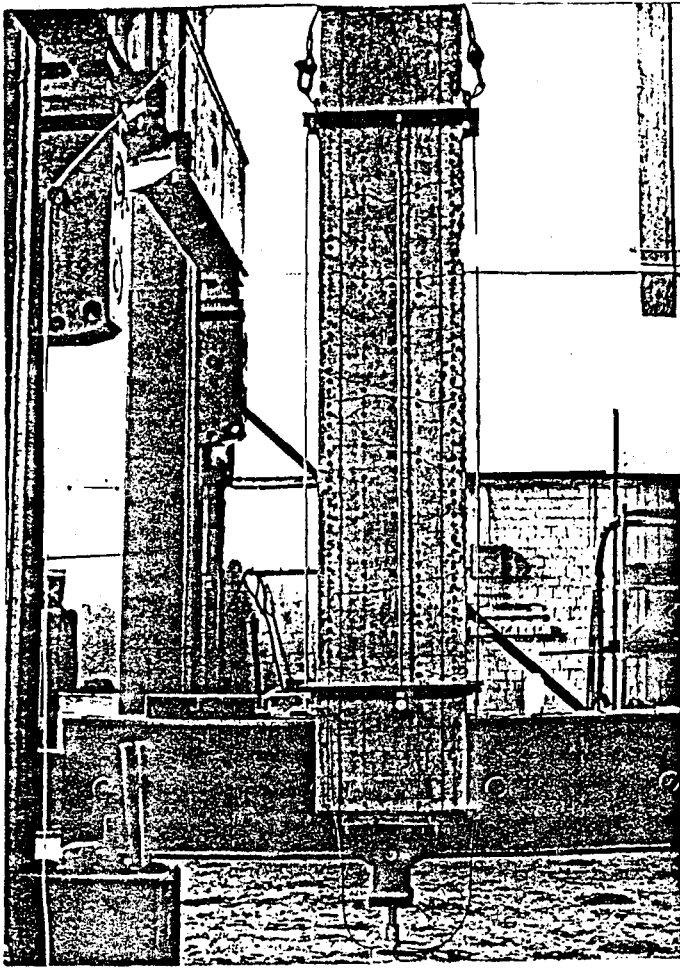


Abb. 5.3: Druckkörper in Rüfgerüst,

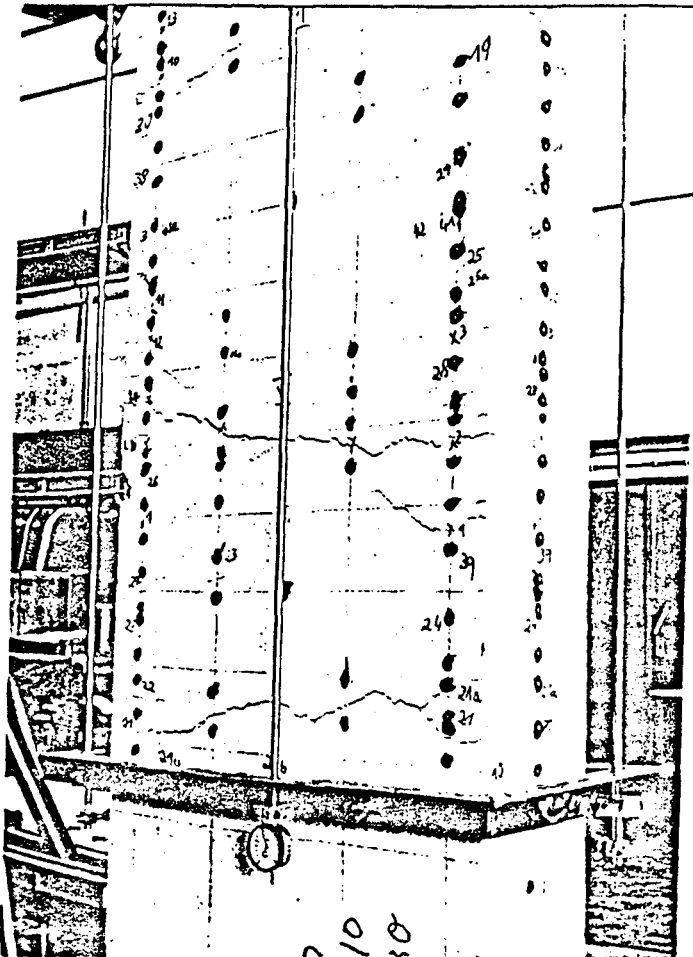
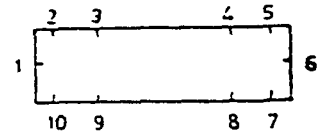
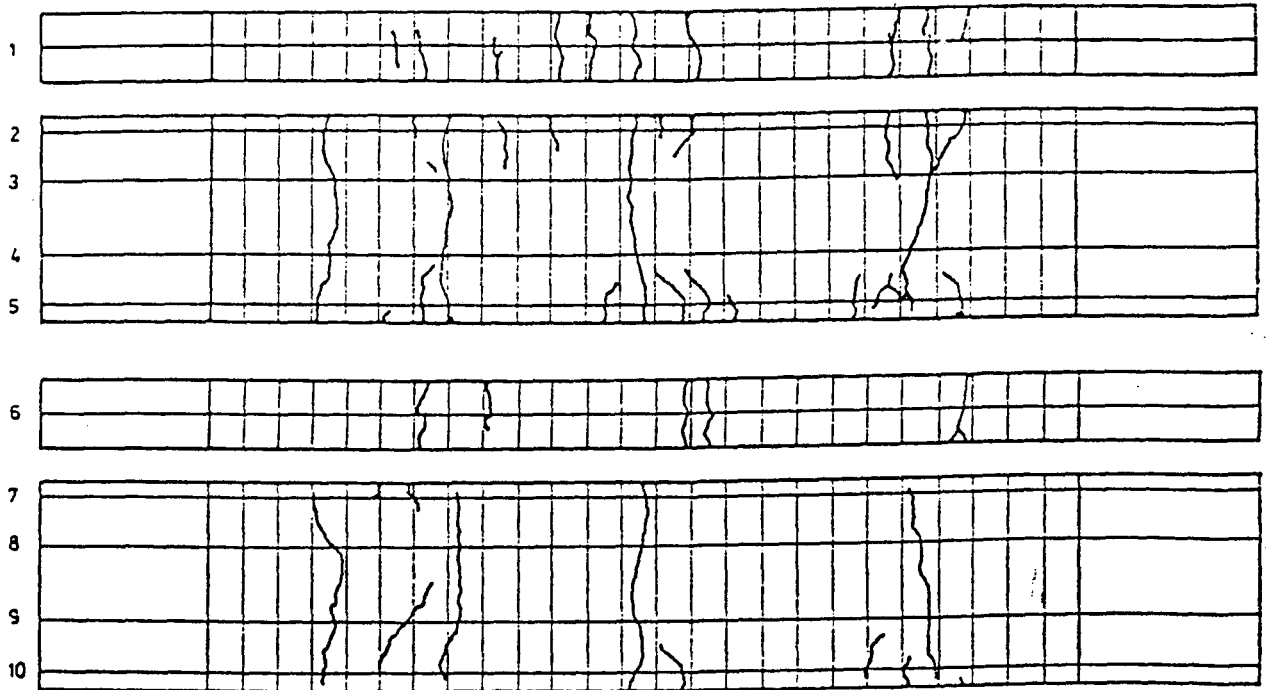


Abb. 5.4: Körperahmen mit Kugeln und Waggeln, Kugeln für Rißbreitenmessung mit dem Tensometer Schließungsmessung

ZK 10/0



LS: 232 kN ($N/A_s = 181 \text{ N/mm}^2$)



LS: 315 kN ($N/A_s = 246 \text{ N/mm}^2$)

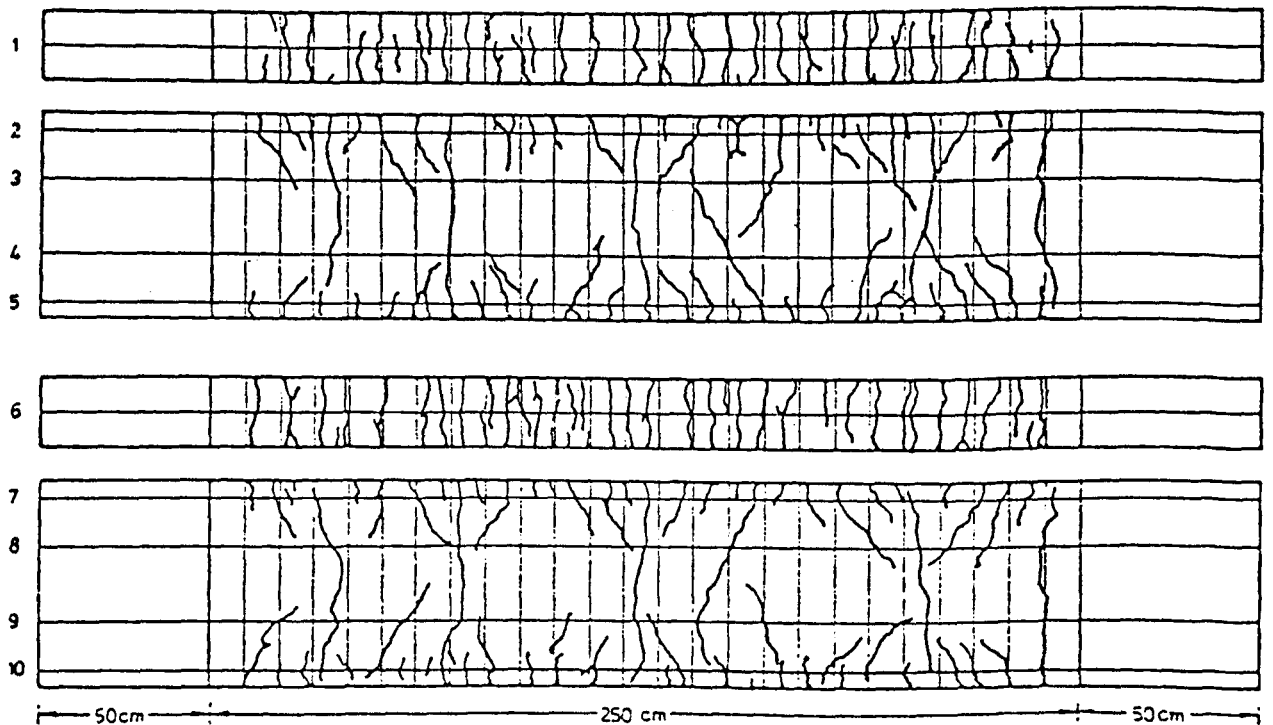
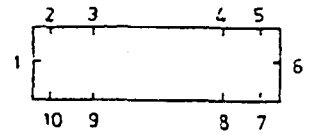
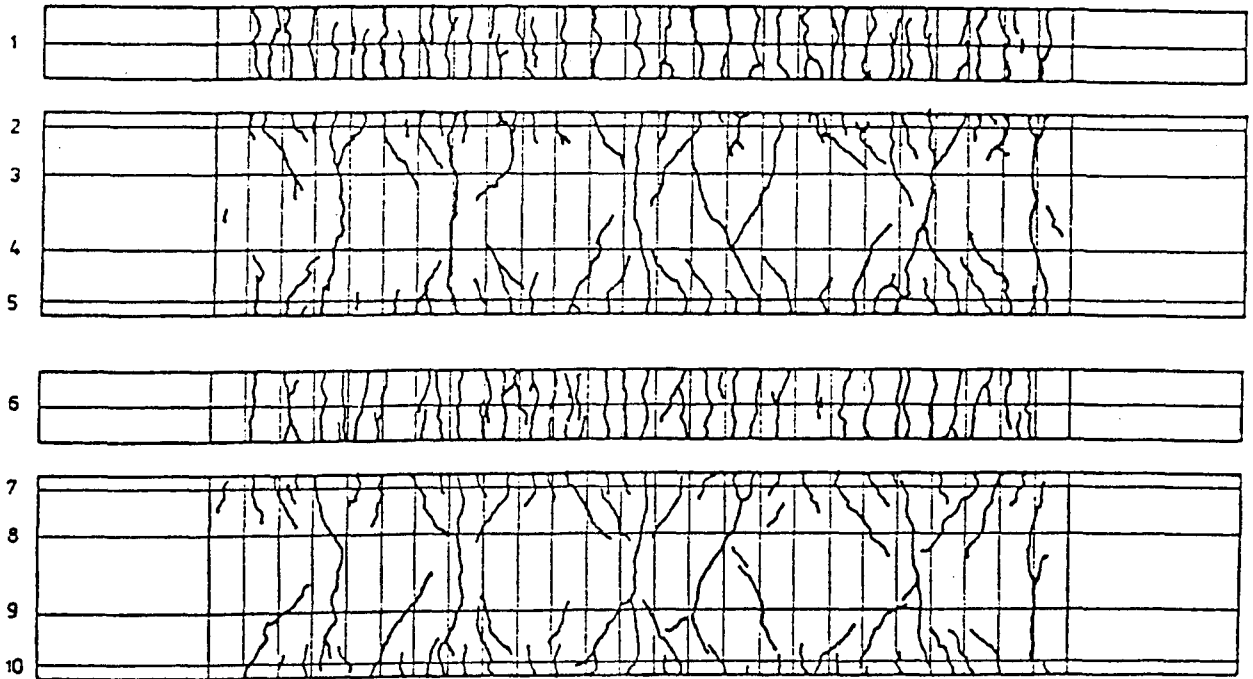


Abbildung 6.22a: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 10/0;
Laststufen 232 und 315 kN

ZK 10 / 0



LS: 392 kN, 10^5 LW ($N/A_s = 306 \text{ N/mm}^2$)



LS: 545 kN ($N/A_s = 425 \text{ N/mm}^2$)

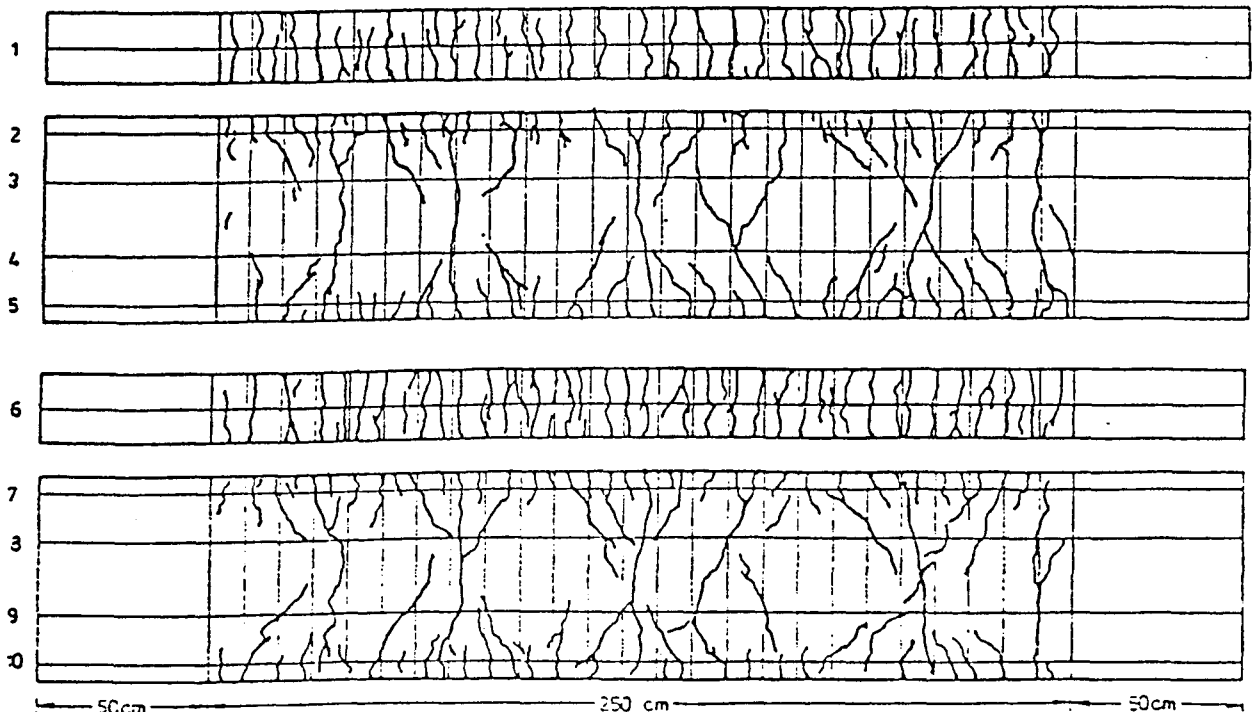
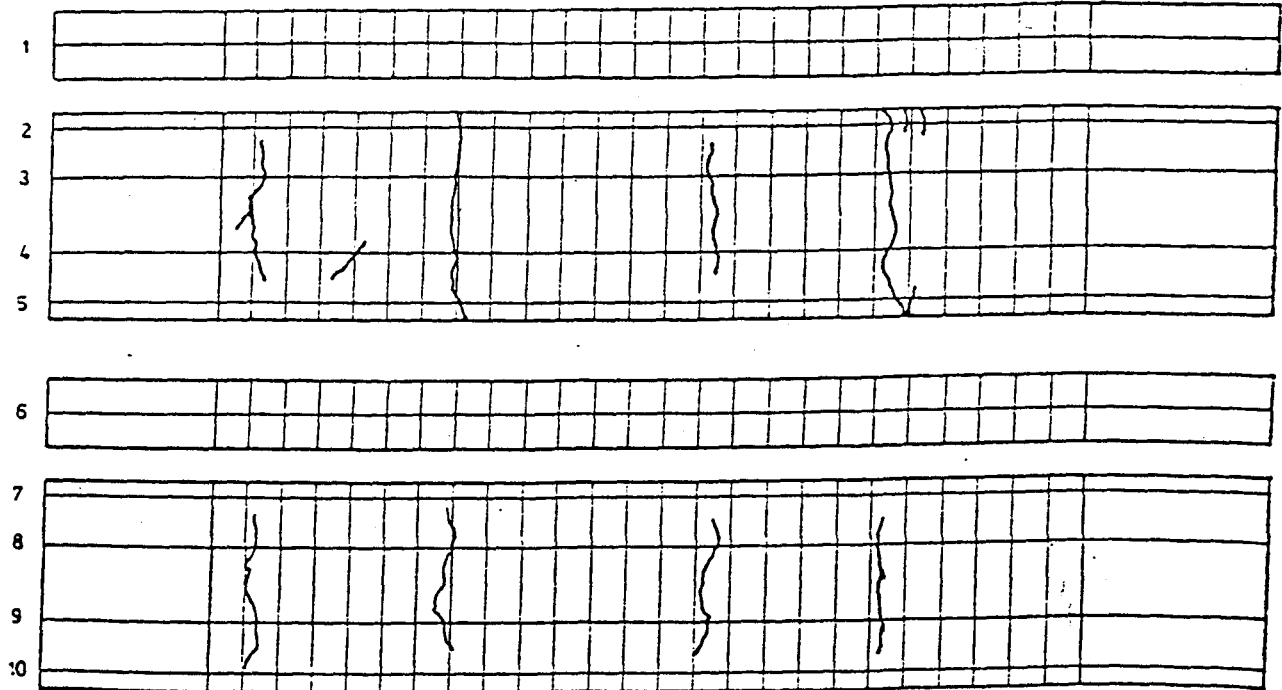
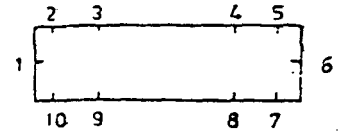


Abbildung 6.22b: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 10/0;
Laststufen 392 und 545 kN

ZK 10/1,5

LS: 232 kN ($N/A_s = 181 \text{ N/mm}^2$)



LS: 315 kN ($N/A_s = 246 \text{ N/mm}^2$)

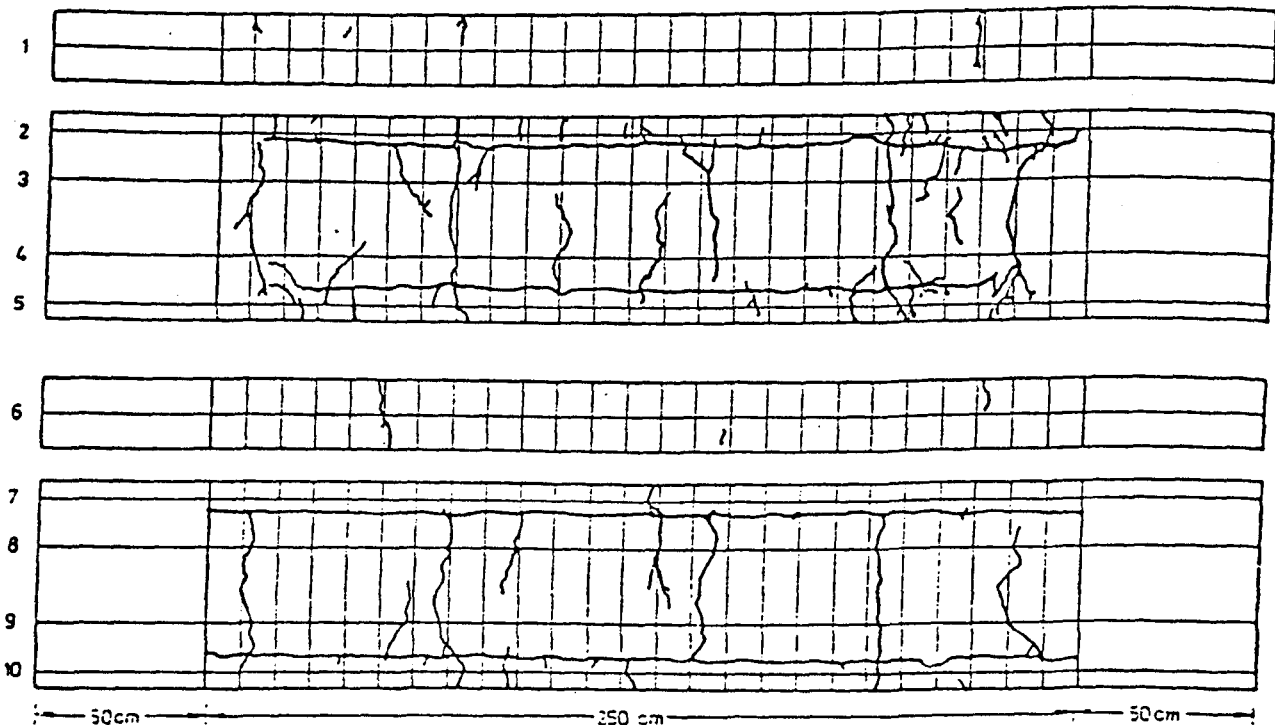
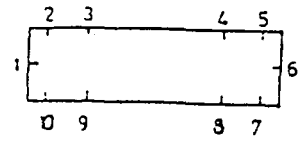
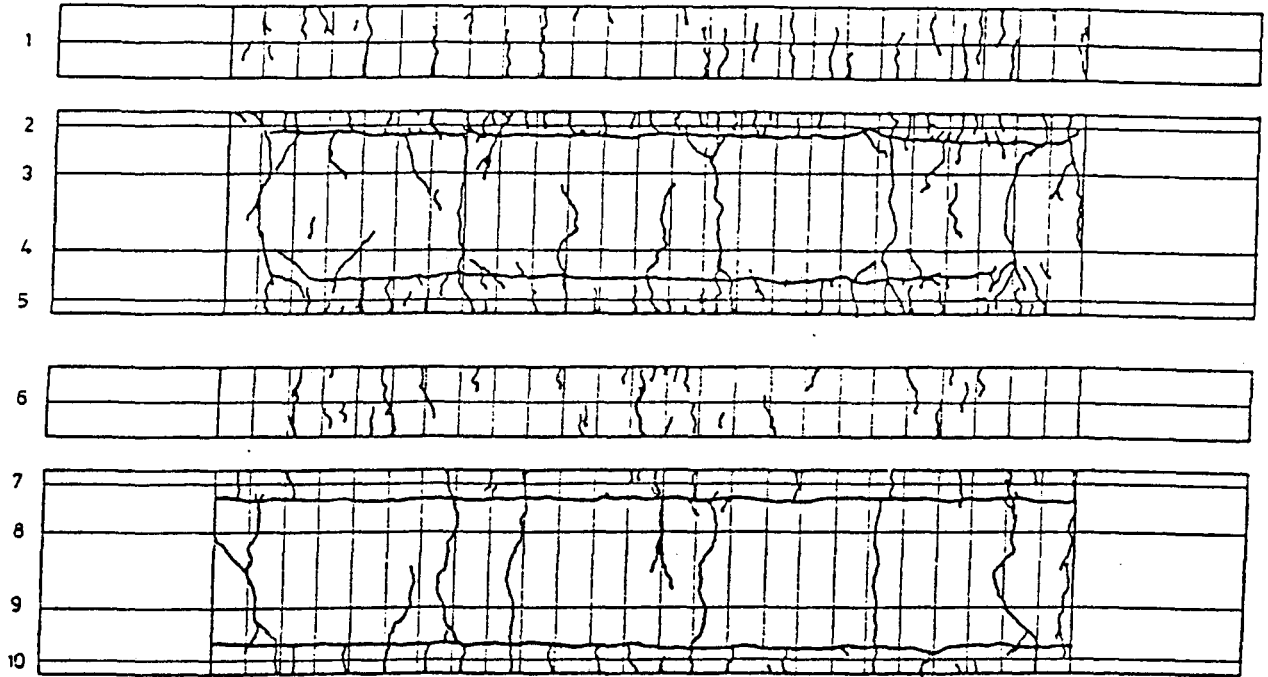


Abbildung 6.23a: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 10/1,5;
Laststufen 232 und 315 kN

ZK 10/1,5



LS: 392 kN, 10^5 LW ($N/A_s = 306 \text{ N/mm}^2$)



LS: 545 kN ($N/A_s = 425 \text{ N/mm}^2$)

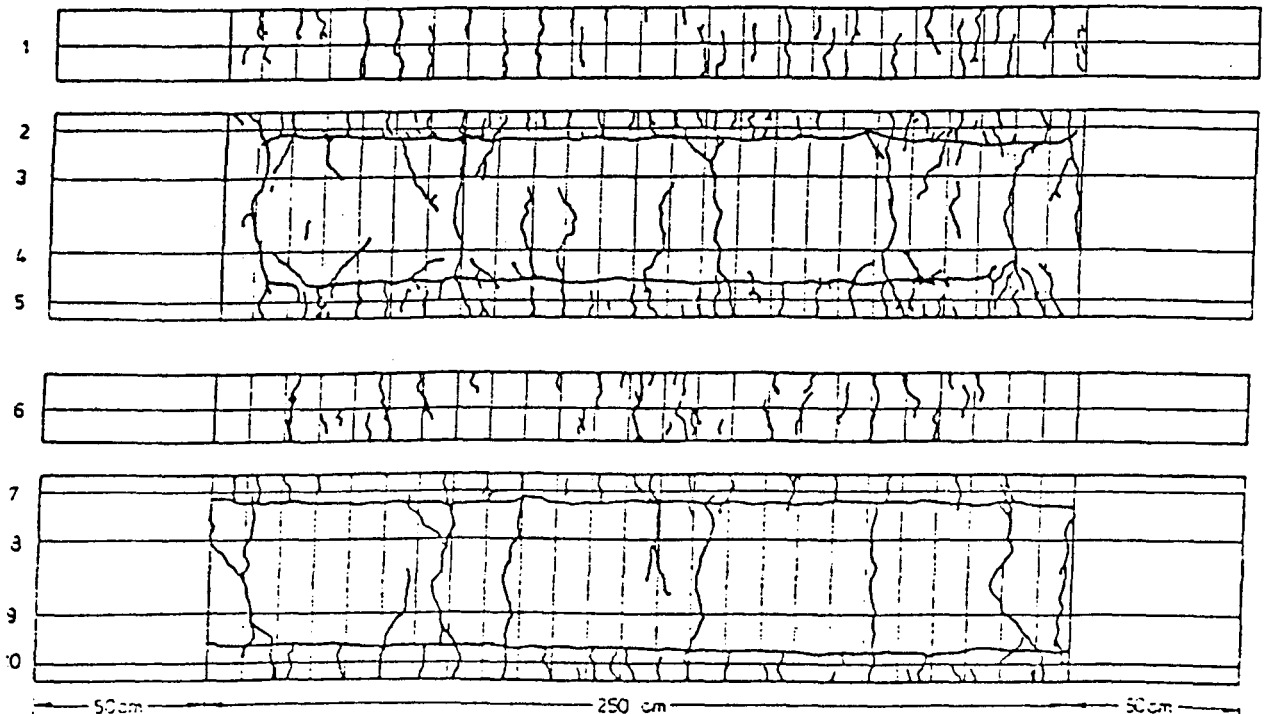
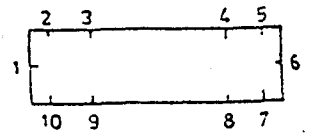
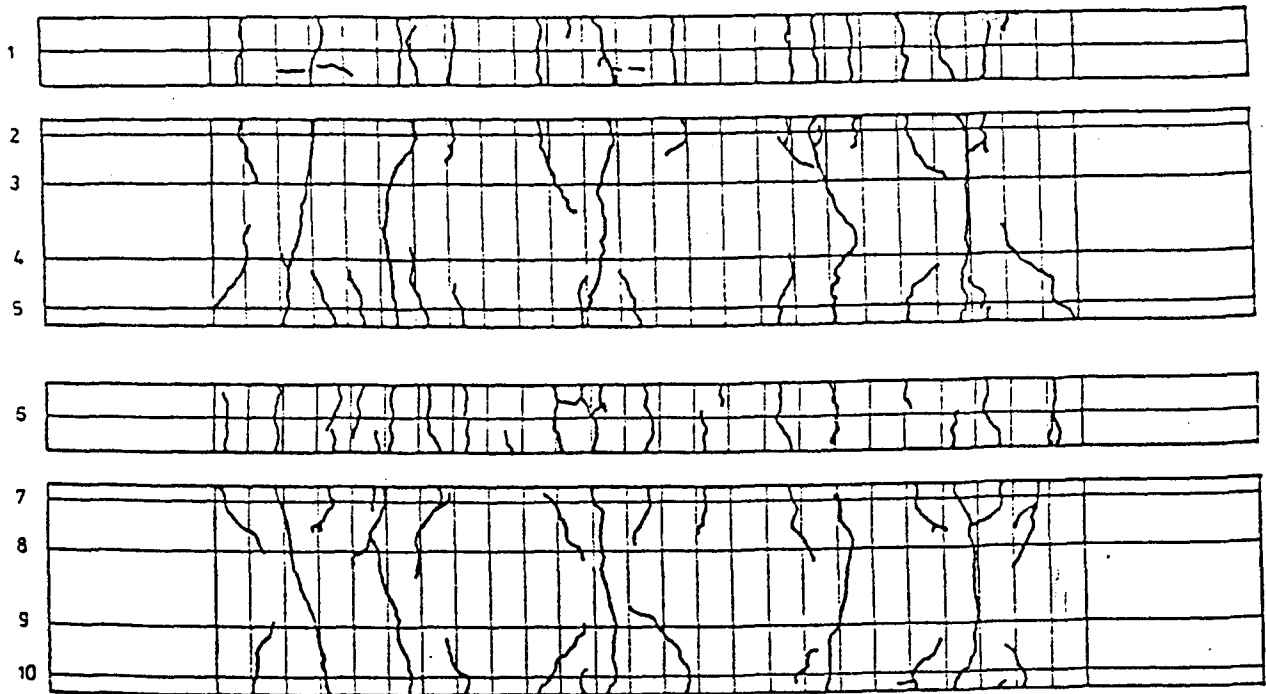


Abbildung 6.23b: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 10/1,5;
Laststufen 392 und 545 kN

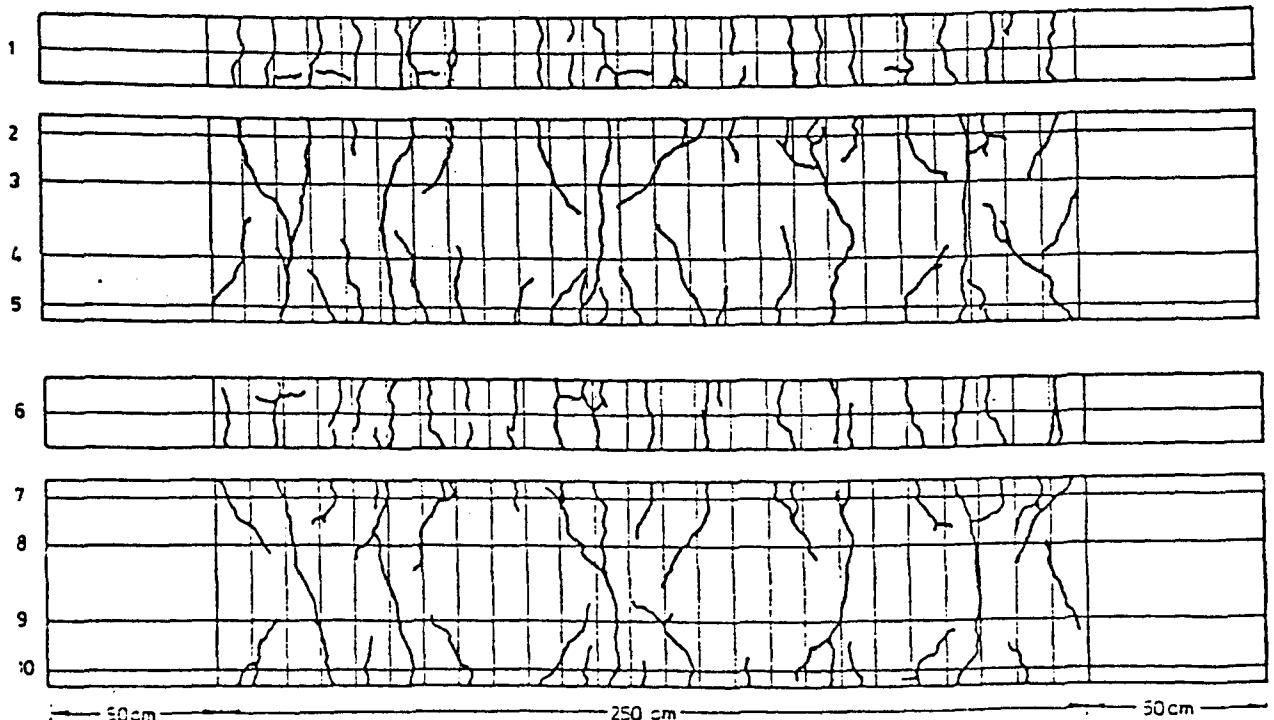
ZK 20/0



LS: 240 kN ($N/A_s = 191 \text{ N/mm}^2$)



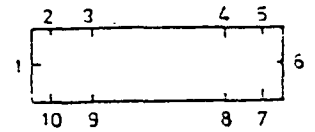
LS: 323 kN ($N/A_s = 257 \text{ N/mm}^2$)



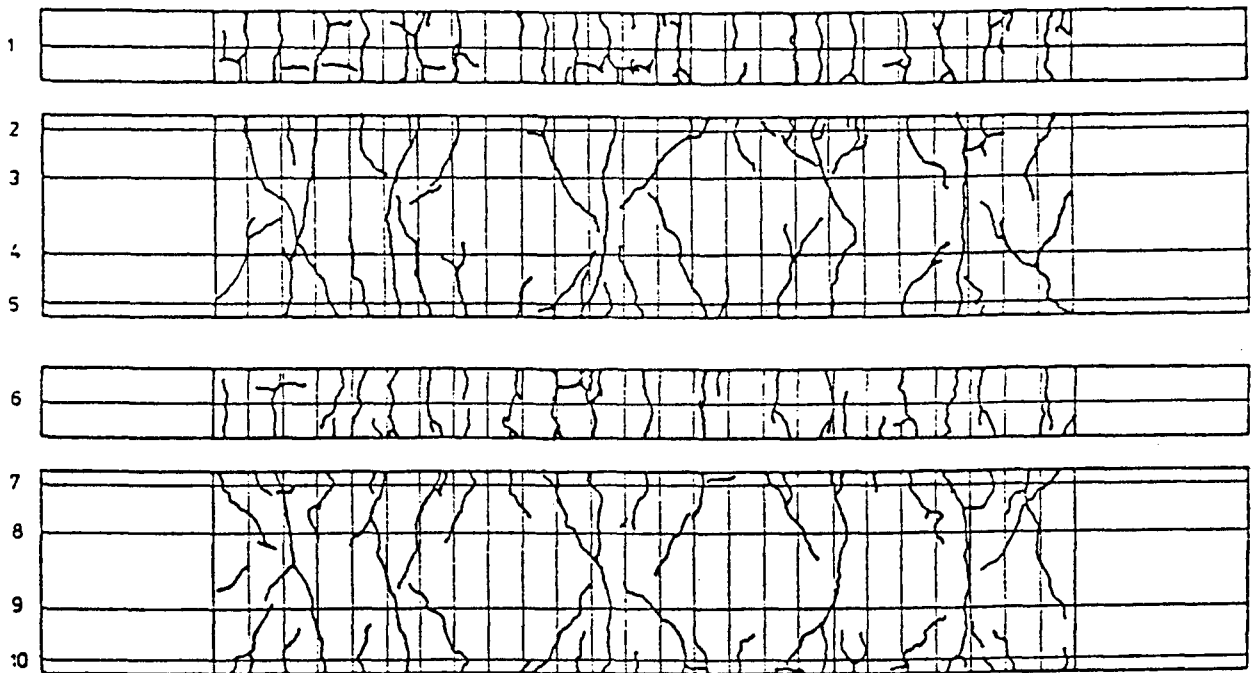
50 cm 250 cm 50 cm

Abbildung 6.24a: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 20/0;
Laststufen 240 und 323 kN

ZK 20/0



LS: 400 kN, 10^5 LW ($N/A_s = 319 \text{ N/mm}^2$)



LS: 553 kN ($N/A_s = 440 \text{ N/mm}^2$)

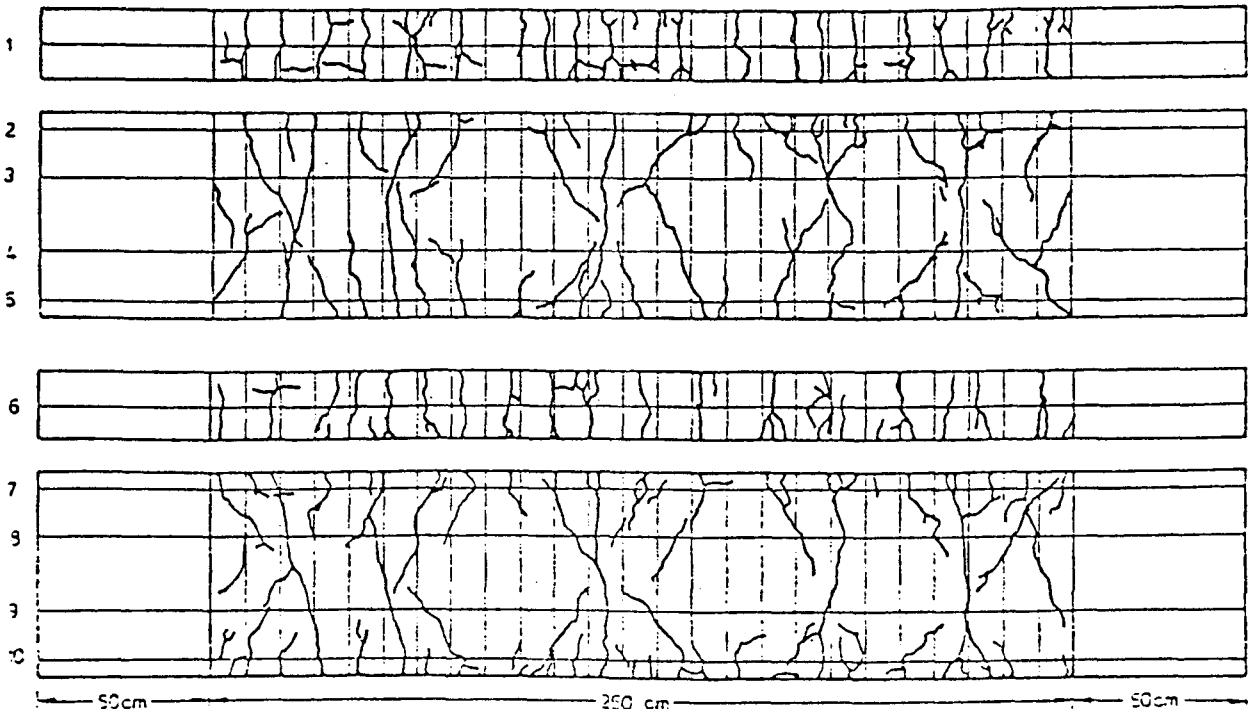
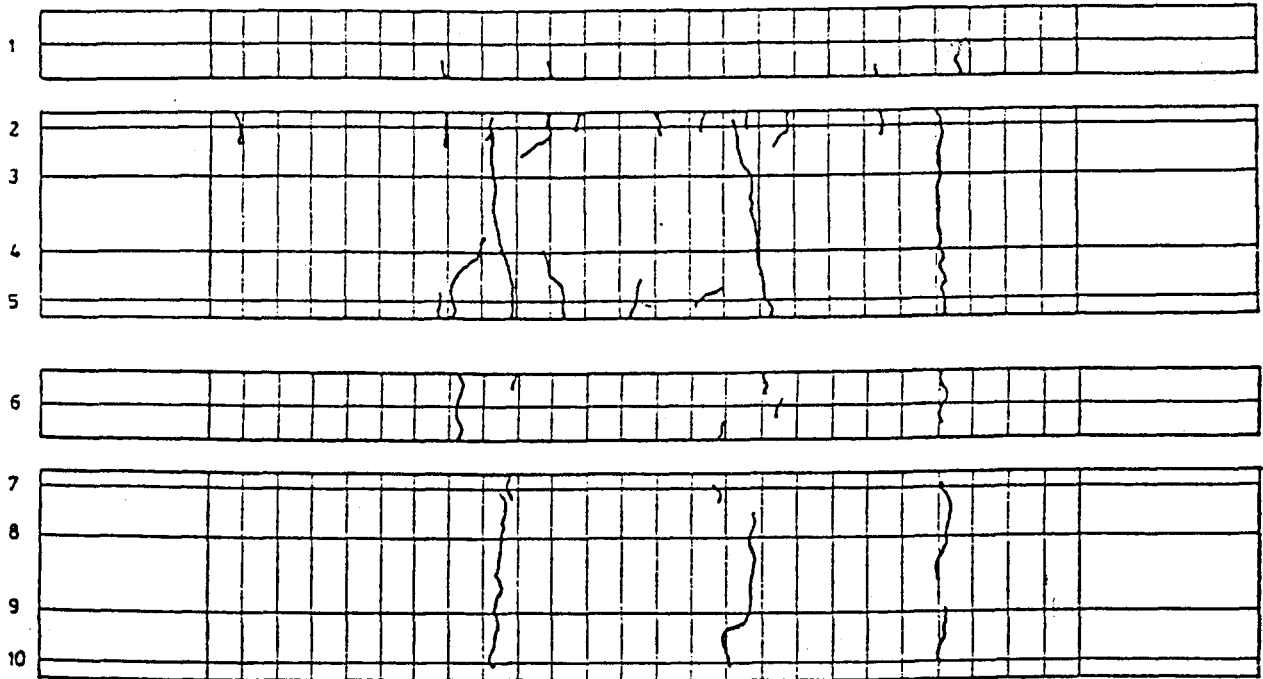
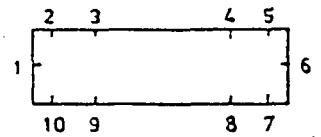


Abbildung 6.24b: Ribbilder des Versuchskörpers ZK 20/0;
Laststufen 400 und 553 kN

ZK 20/1,5

LS: 232 kN ($N/A_s = 185 \text{ N/mm}^2$)



LS: 315 kN ($N/A_s = 251 \text{ N/mm}^2$)

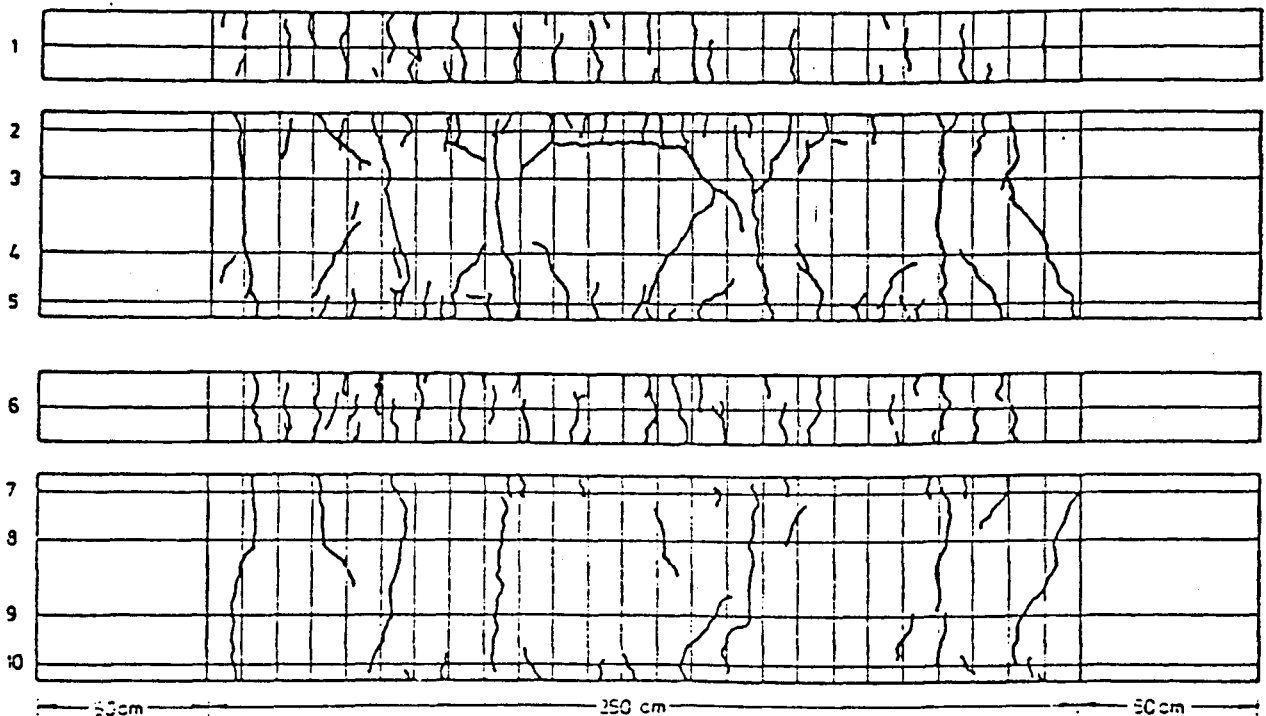
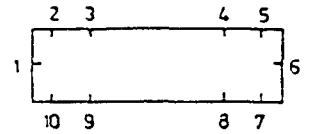
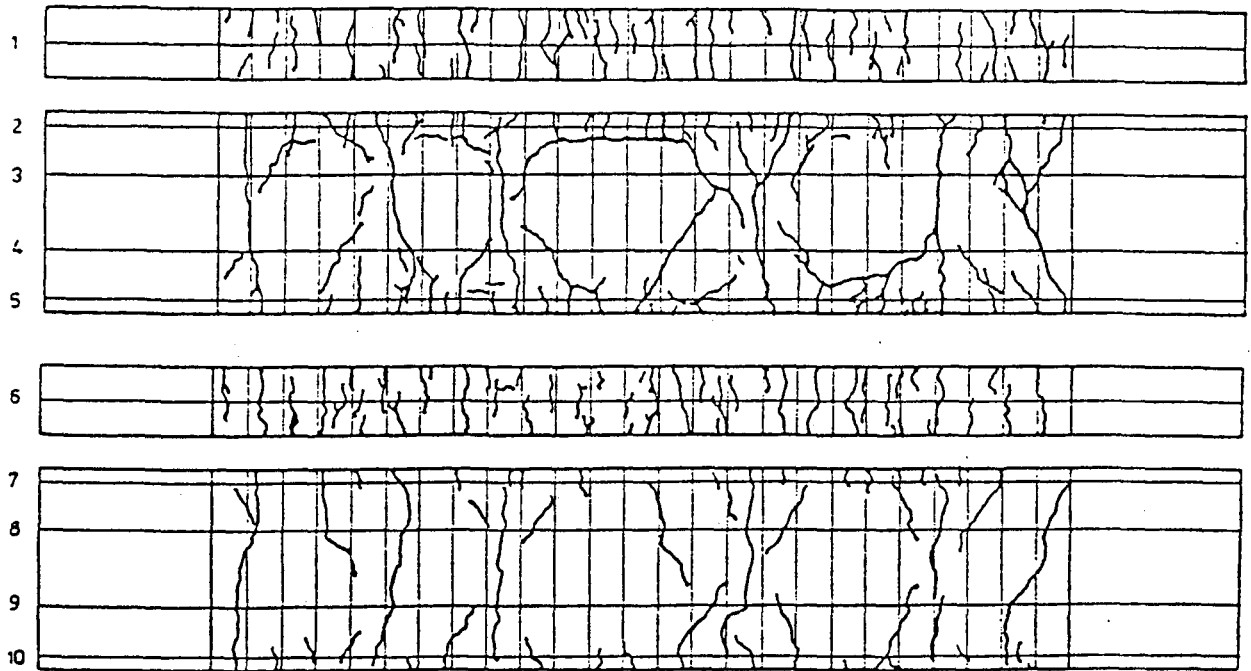


Abbildung 6.25a: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 20/1,5;
Laststufen 232 und 315 kN

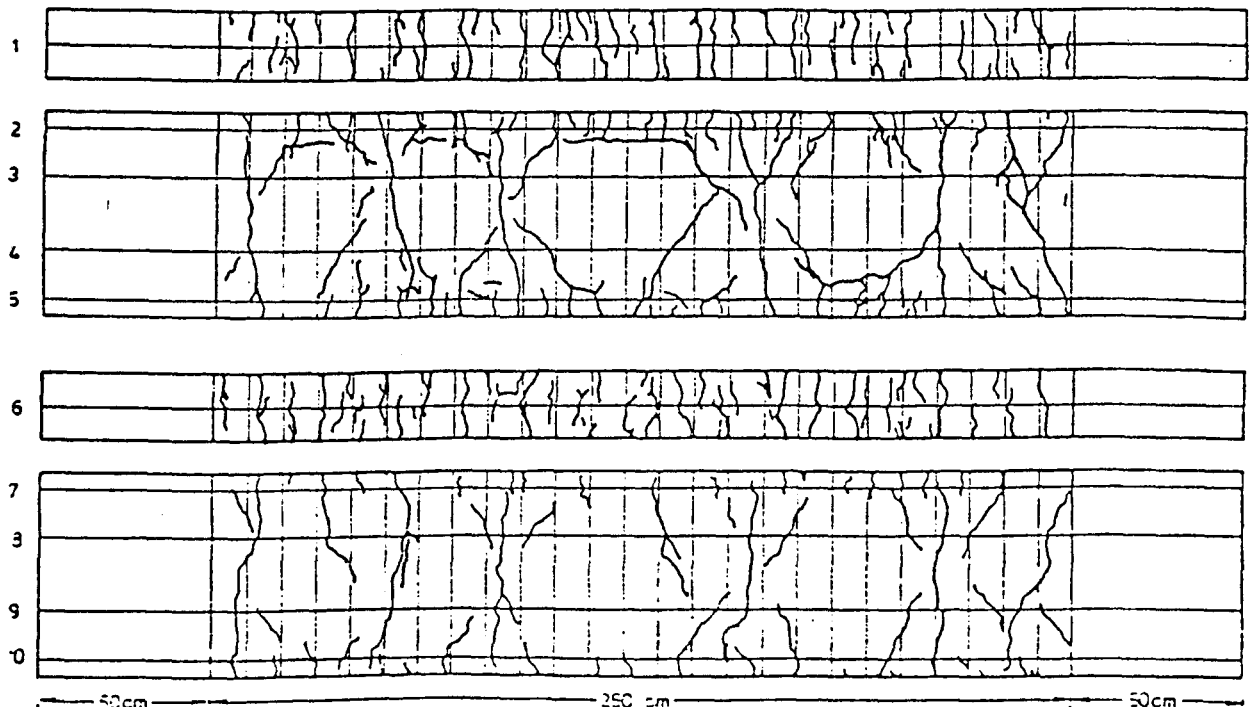
ZK 20/1,5



LS: 392 kN, 10^5 LW ($N/A_s = 312 \text{ N/mm}^2$)



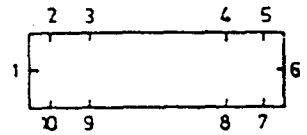
LS: 545 kN ($N/A_s = 434 \text{ N/mm}^2$)



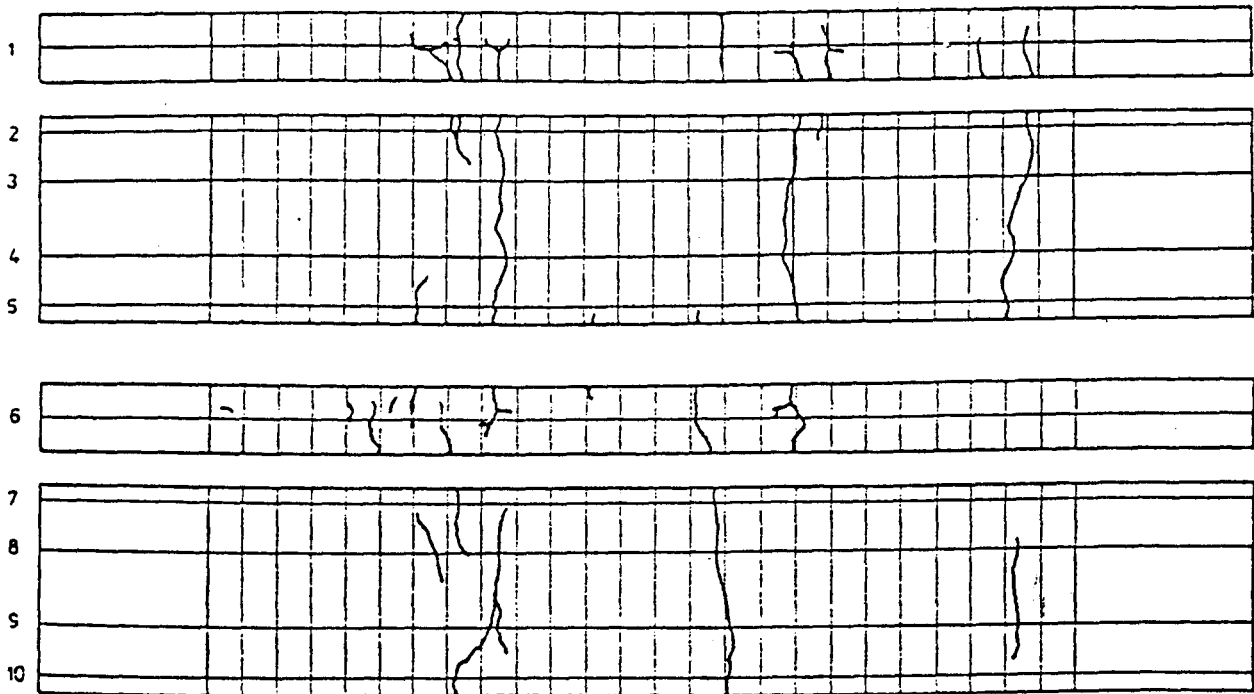
50cm 250 cm 50cm

Abbildung 6.25b: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 20/1,5;
Laststufen 392 und 545 kN

ZK 28/1,5



LS: 232 kN ($N/A_s = 188 \text{ N/mm}^2$)



LS: 315 kN ($N/A_s = 255 \text{ N/mm}^2$)

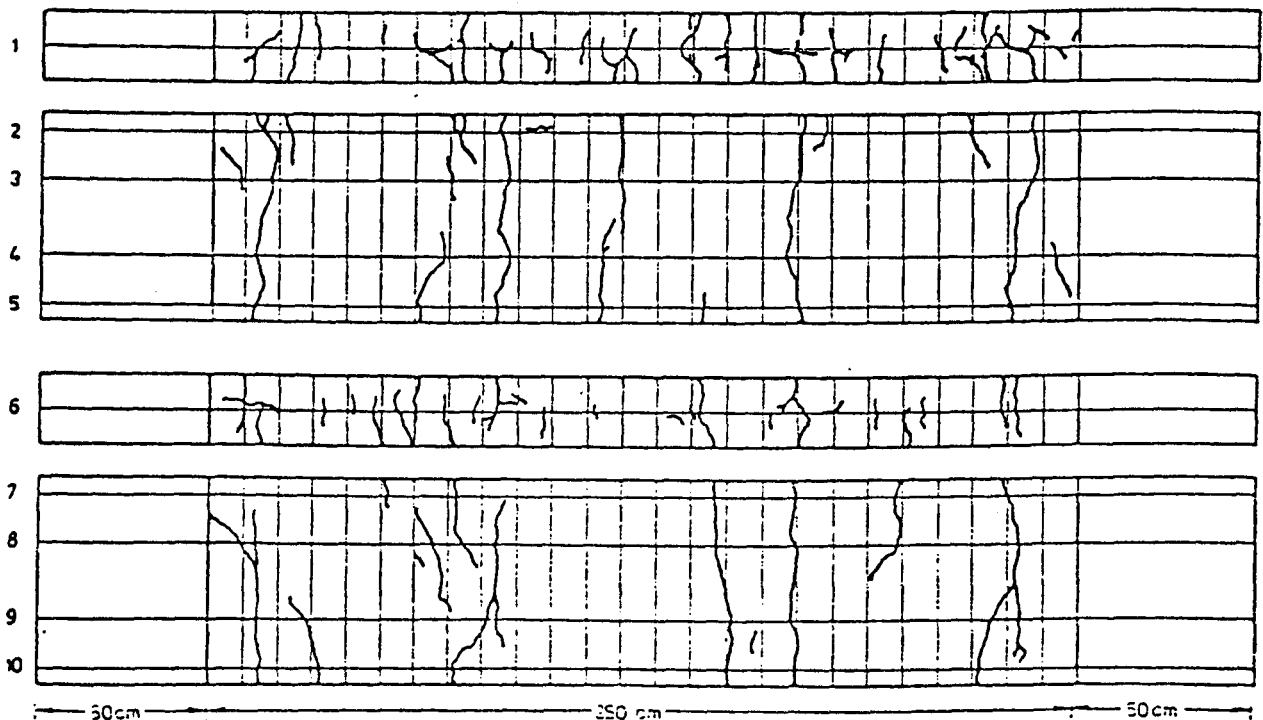
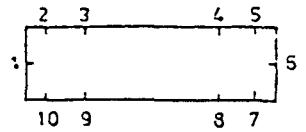
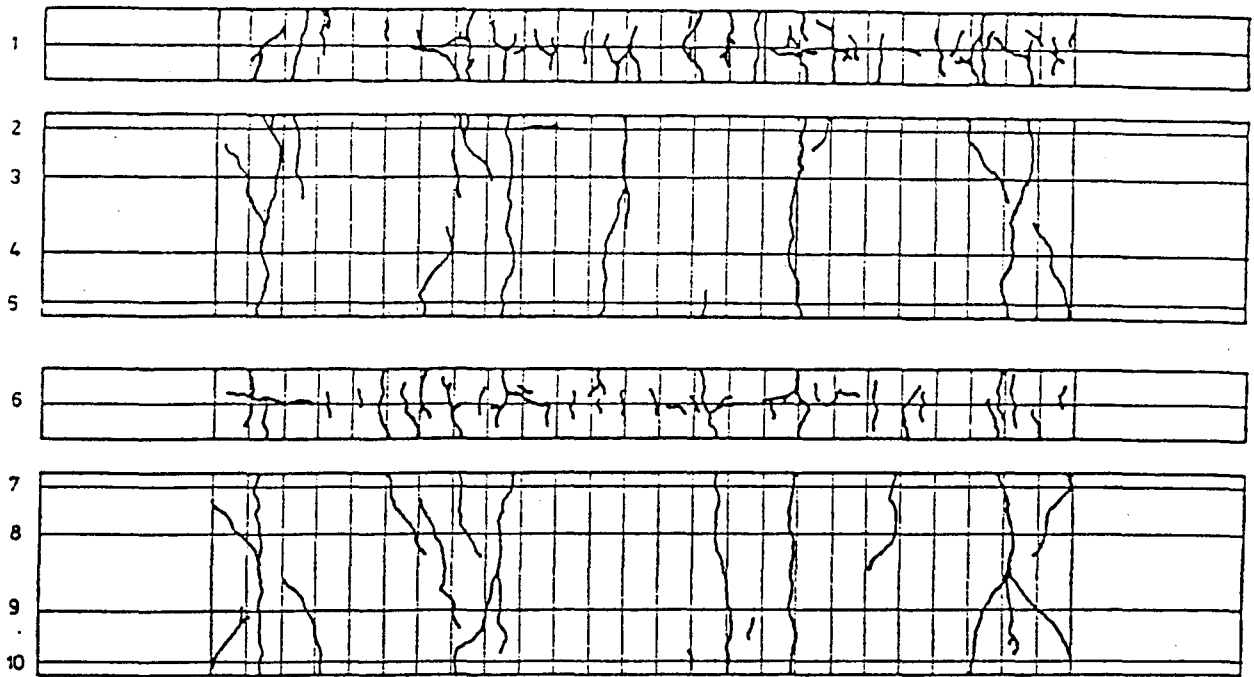


Abbildung 6.26a: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 28/1,5;
Laststufen 232 und 315 kN

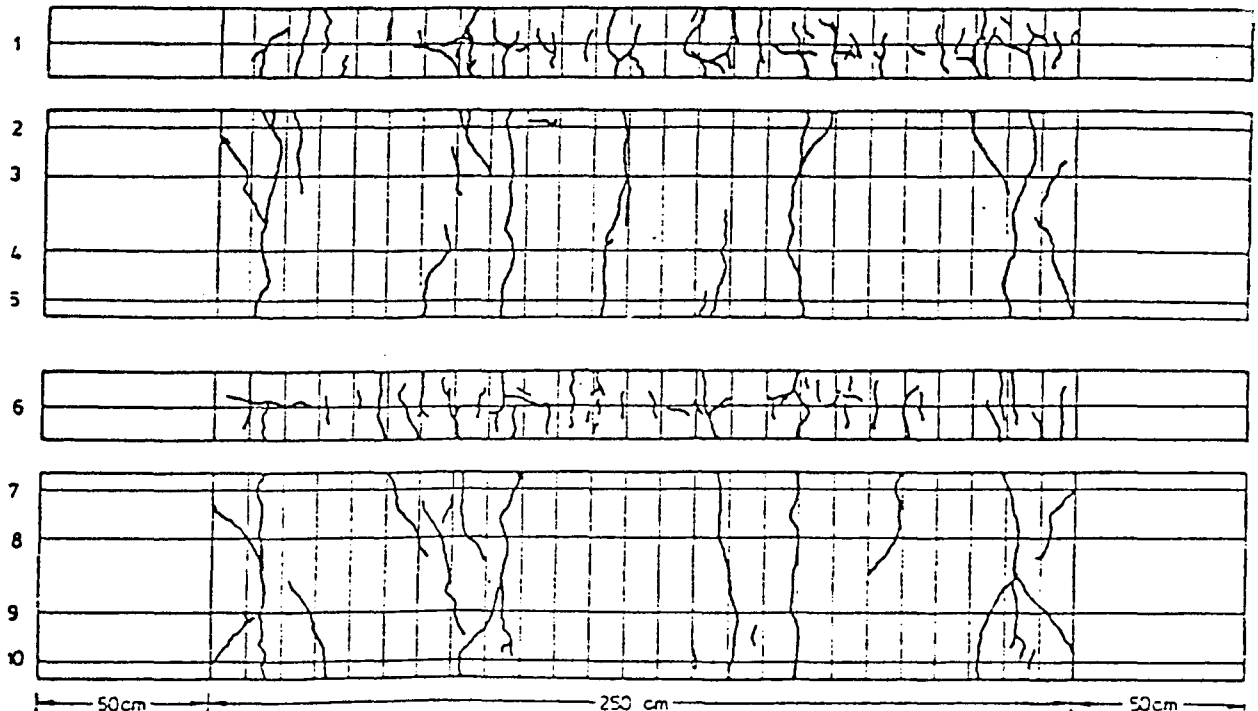
ZK 28/1,5



LS: 392 kN, 10^5 LW ($N/A_s = 317 \text{ N/mm}^2$)



LS: 545 kN ($N/A_s = 441 \text{ N/mm}^2$)



50cm 250 cm 50cm

Abbildung 6.26b: Rißbilder des Versuchskörpers ZK 28/1,5;
Laststufen 392 und 545 kN

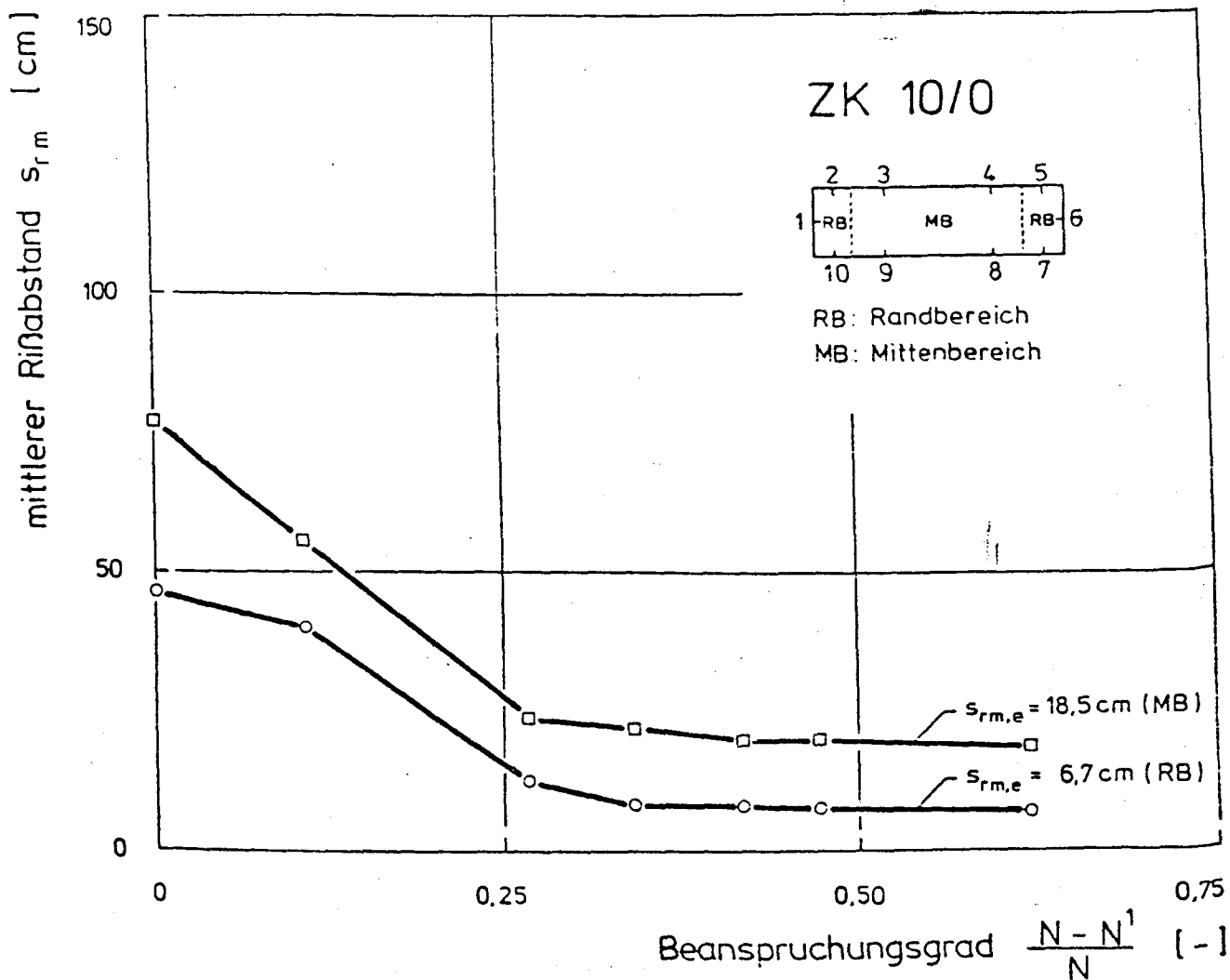


Abbildung 6.27: Mittlerer Rißabstand s_{rm} in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad, Versuchskörper ZK 10/0

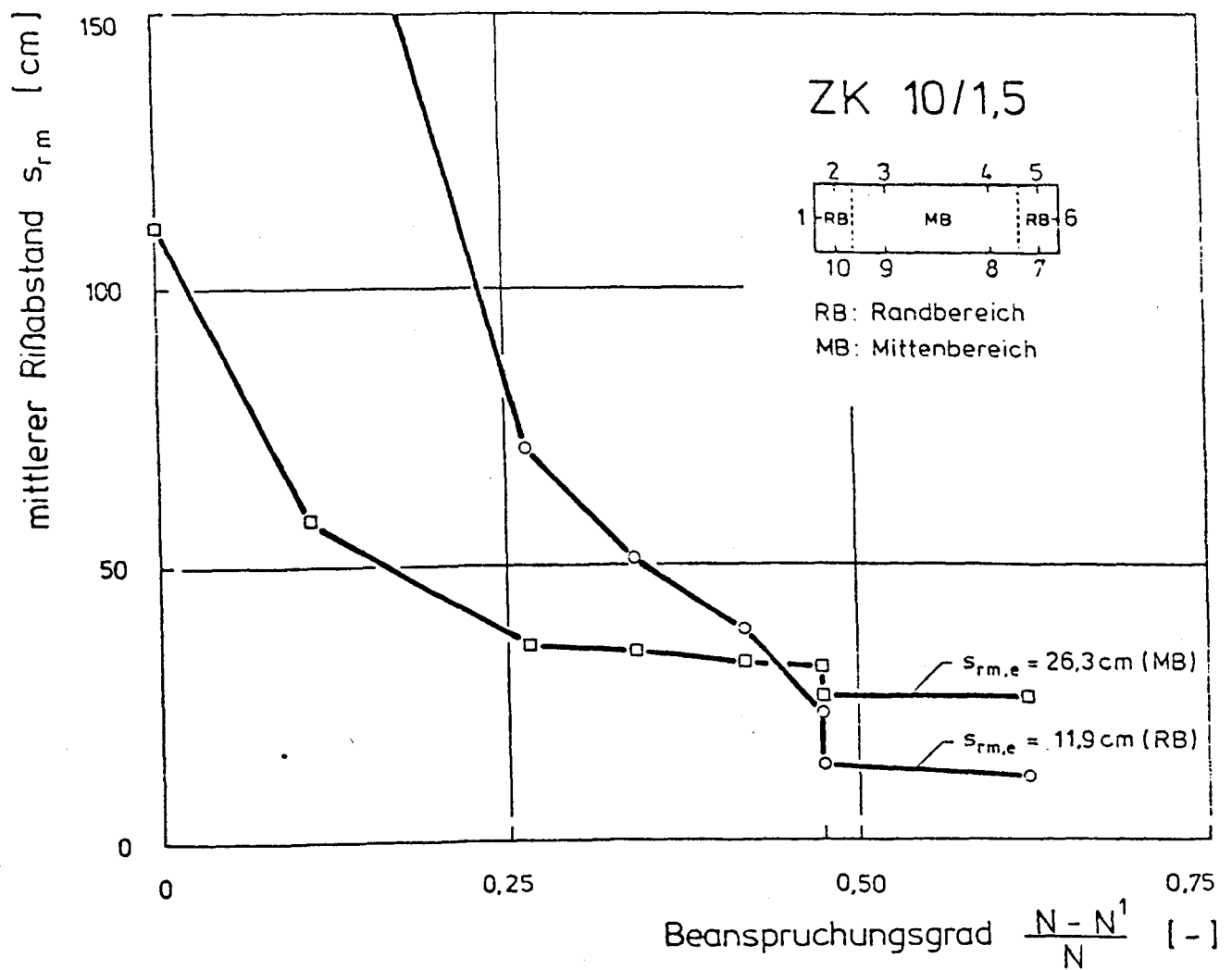


Abbildung 6.28: Mittlerer Rißabstand s_{rm} in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad, Versuchskörper ZK 10/1,5

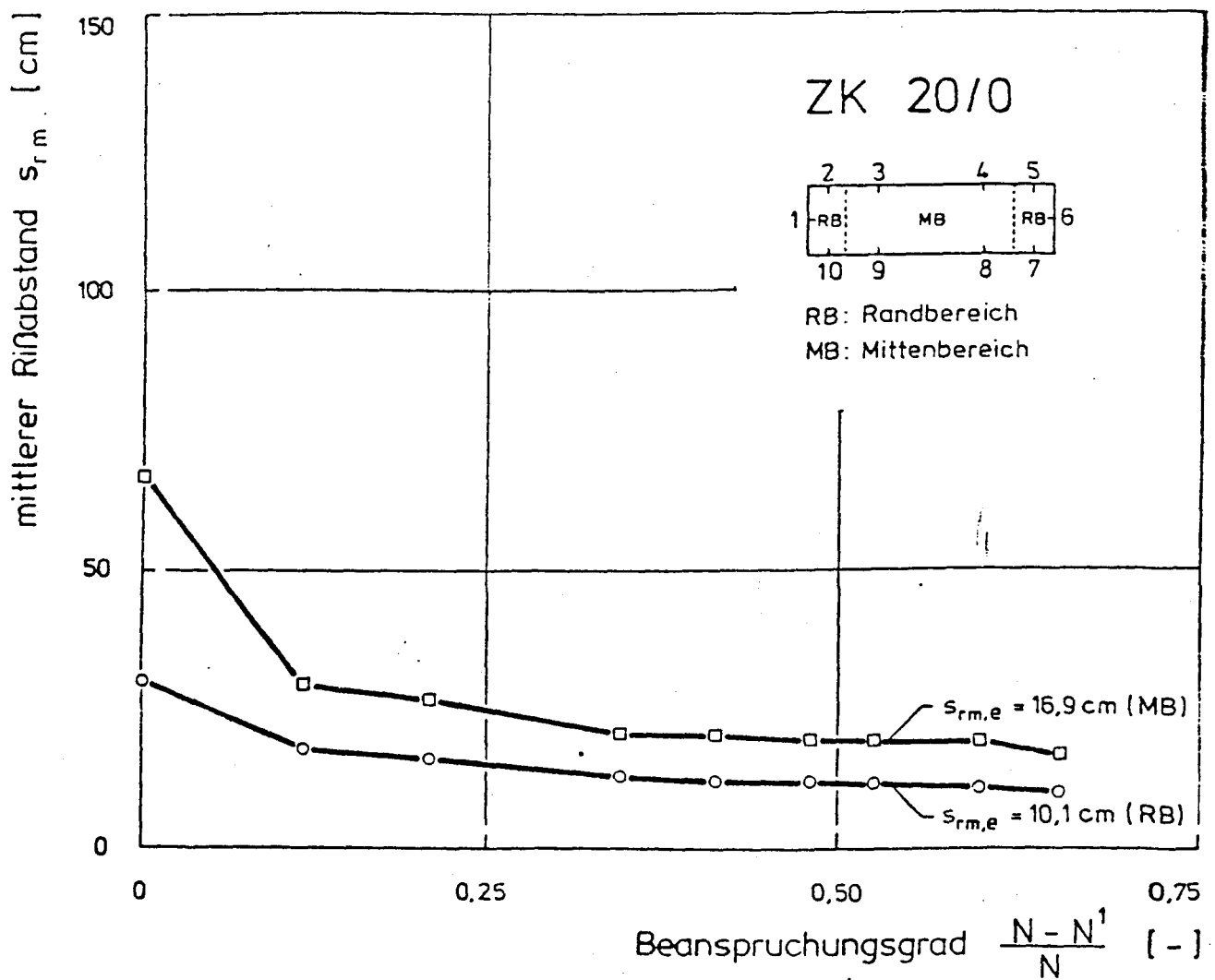


Abbildung 6.29: Mittlerer Rißabstand s_{rm} in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad, Versuchskörper ZK 20/0

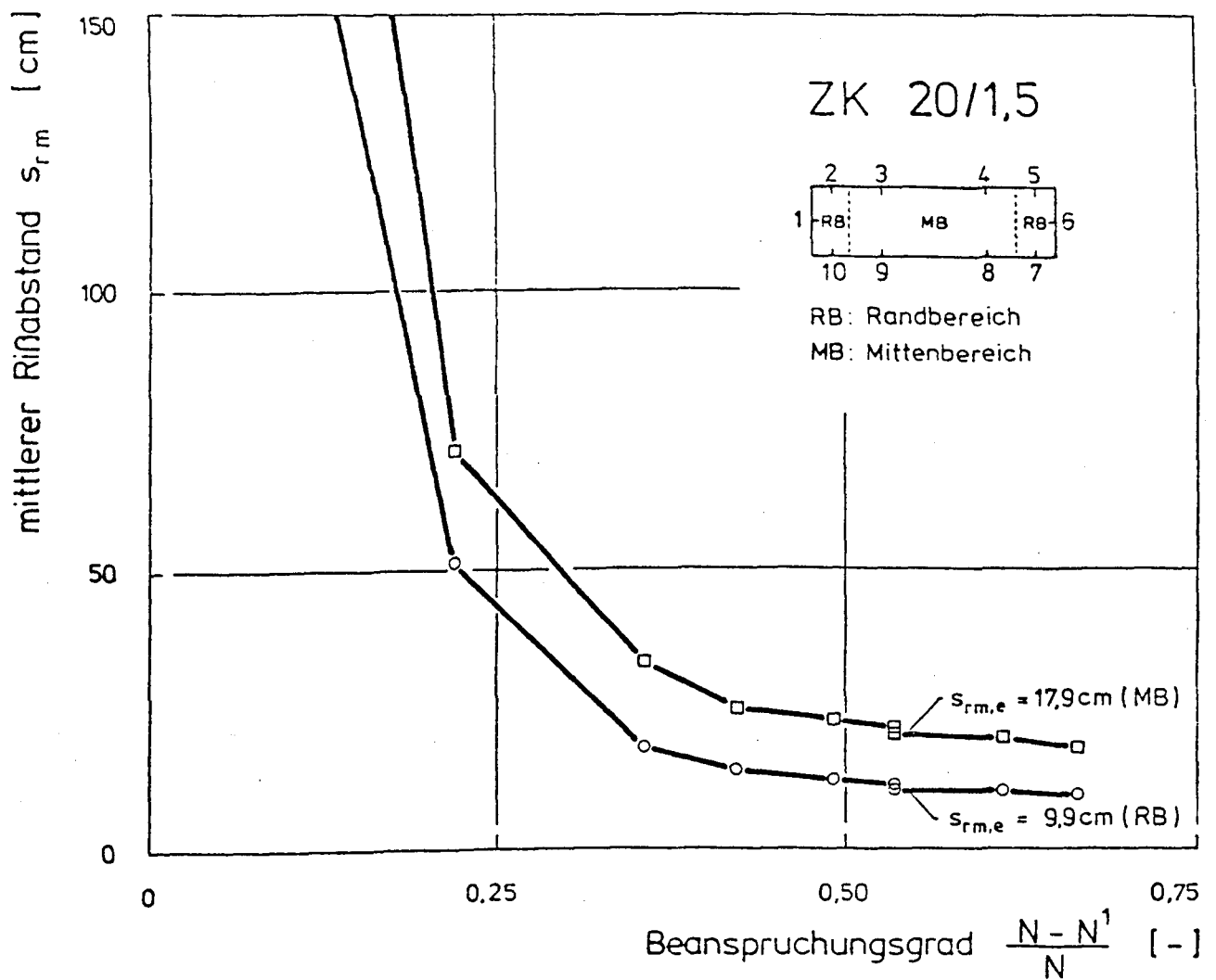


Abbildung 6.30: Mittlerer Rißabstand $s_{r,m}$ in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad, Versuchskörper ZK 20/1,5

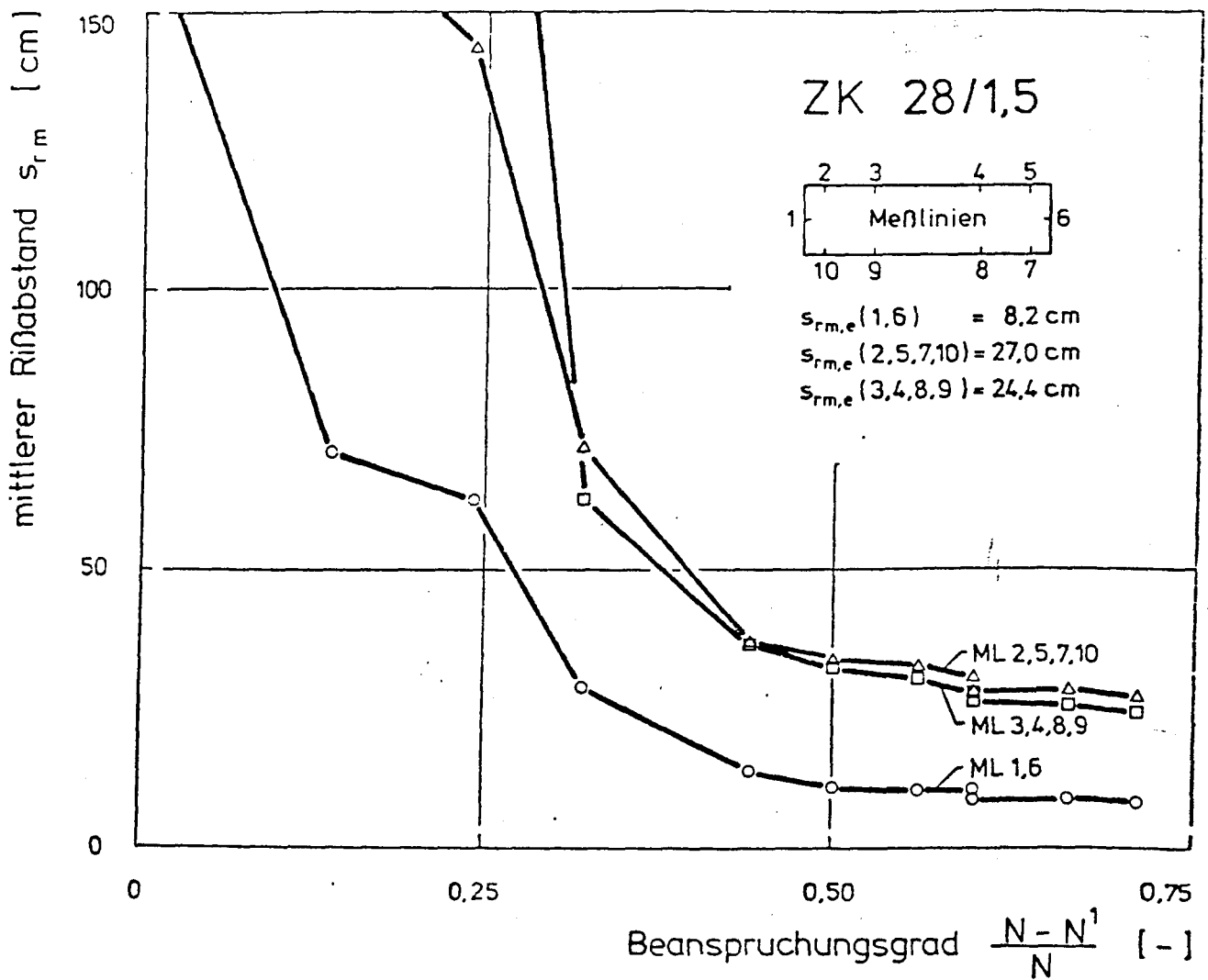


Abbildung 6.31: Mittlerer Rißabstand s_{rm} in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad, Versuchskörper ZK 28/1,5

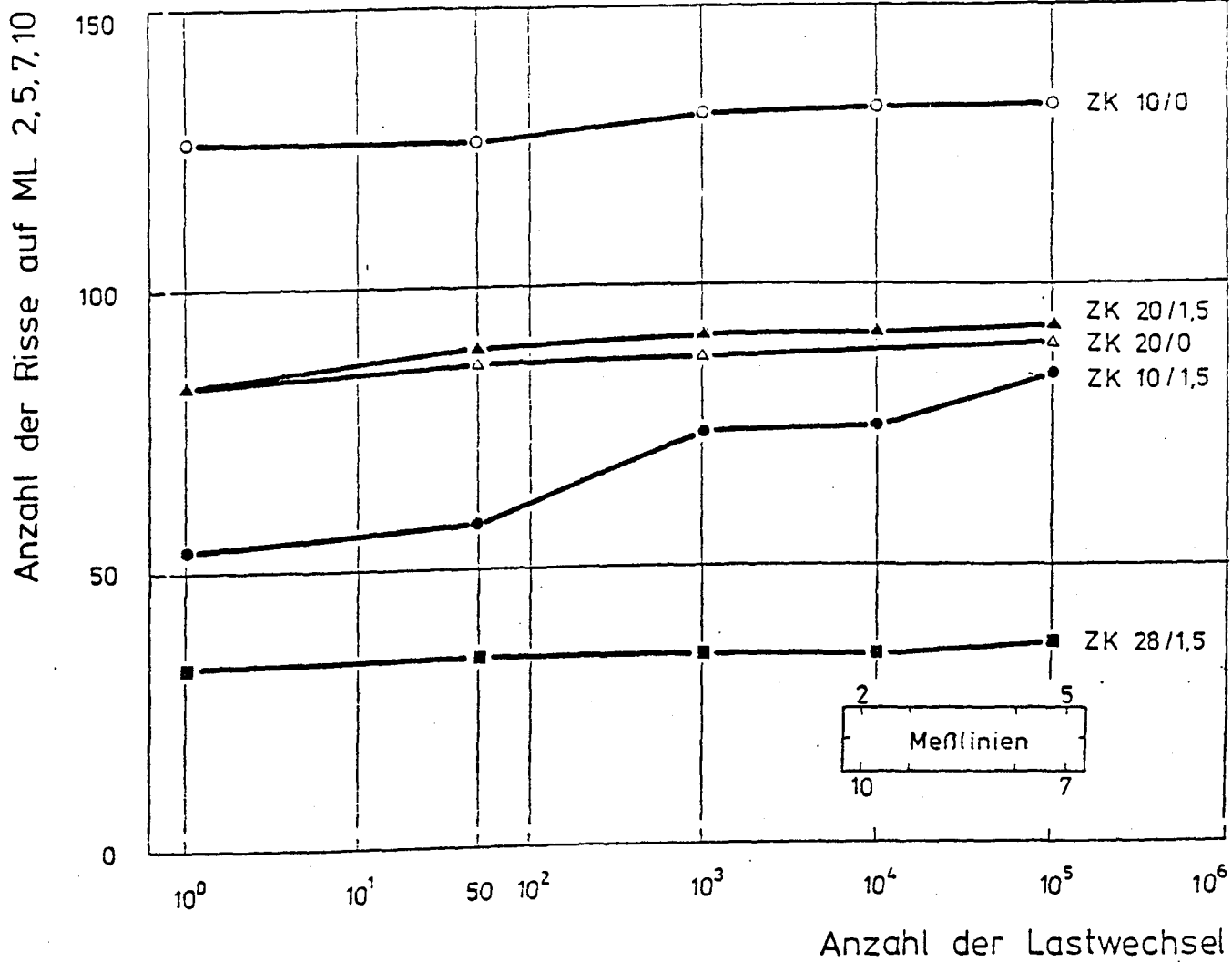


Abbildung 6.32: Anzahl der Risse auf den Meßlinien 2,5,7 und 10 in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel

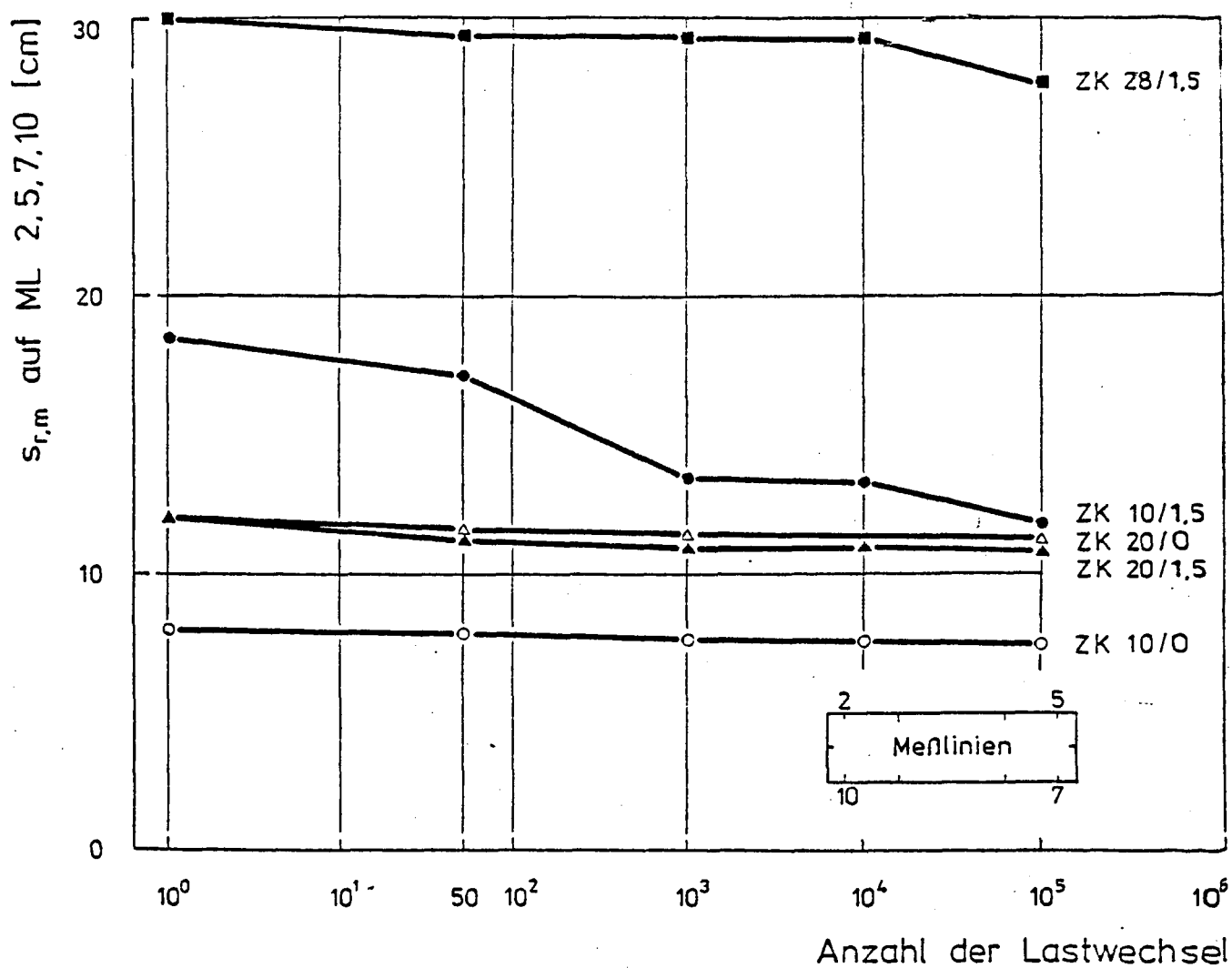


Abbildung 6.33: Mittlerer Rißabstand $s_{r,m}$ auf den Meßlinien 2, 5, 7 und 10 in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel

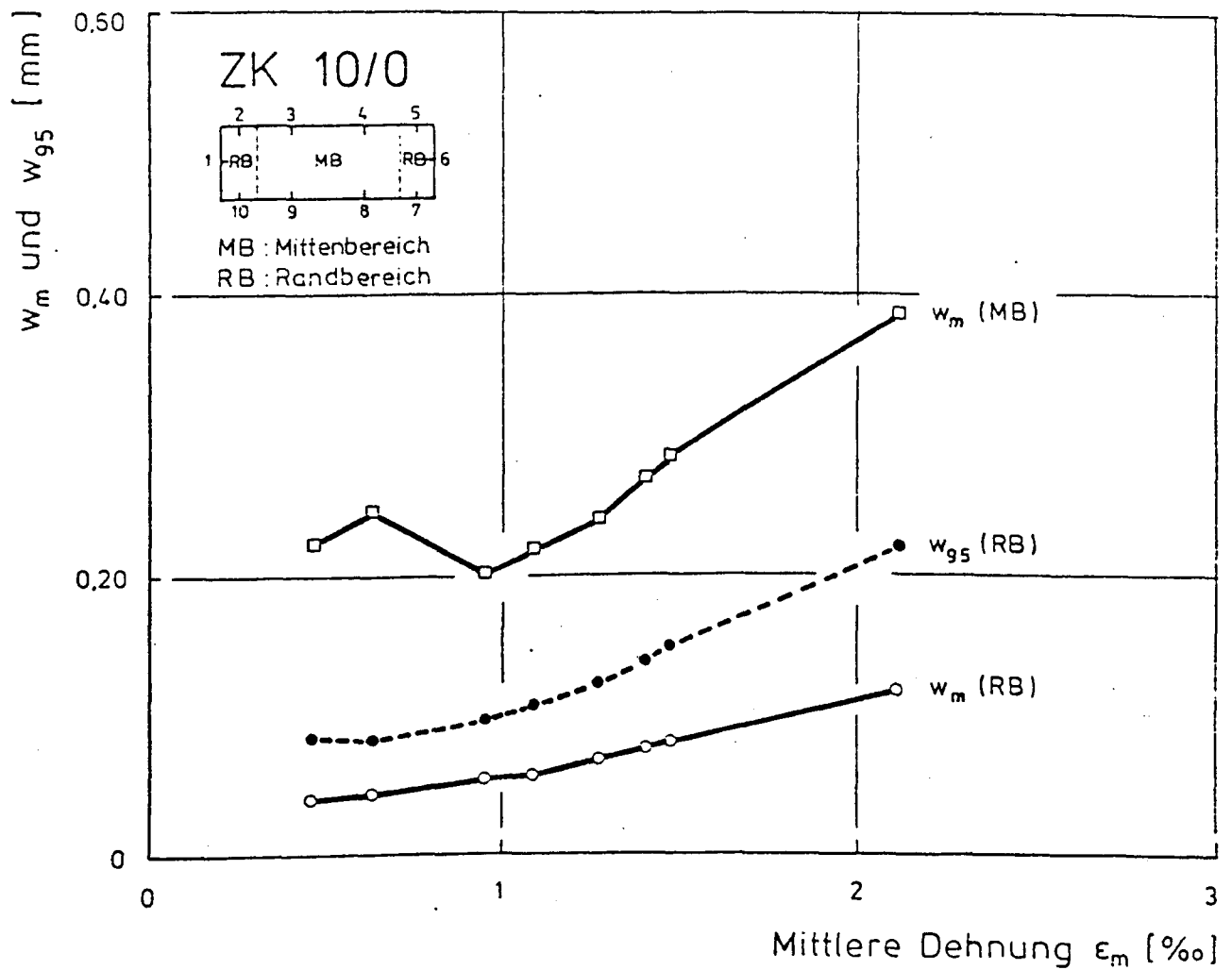


Abbildung 6.34: Mittlere Rißbreite w_m im Randbereich und im Mittenbereich und kritische Rißbreite w_{95} im Randbereich in Abhängigkeit von der mittleren Dehnung ϵ_m für ZK 10/0

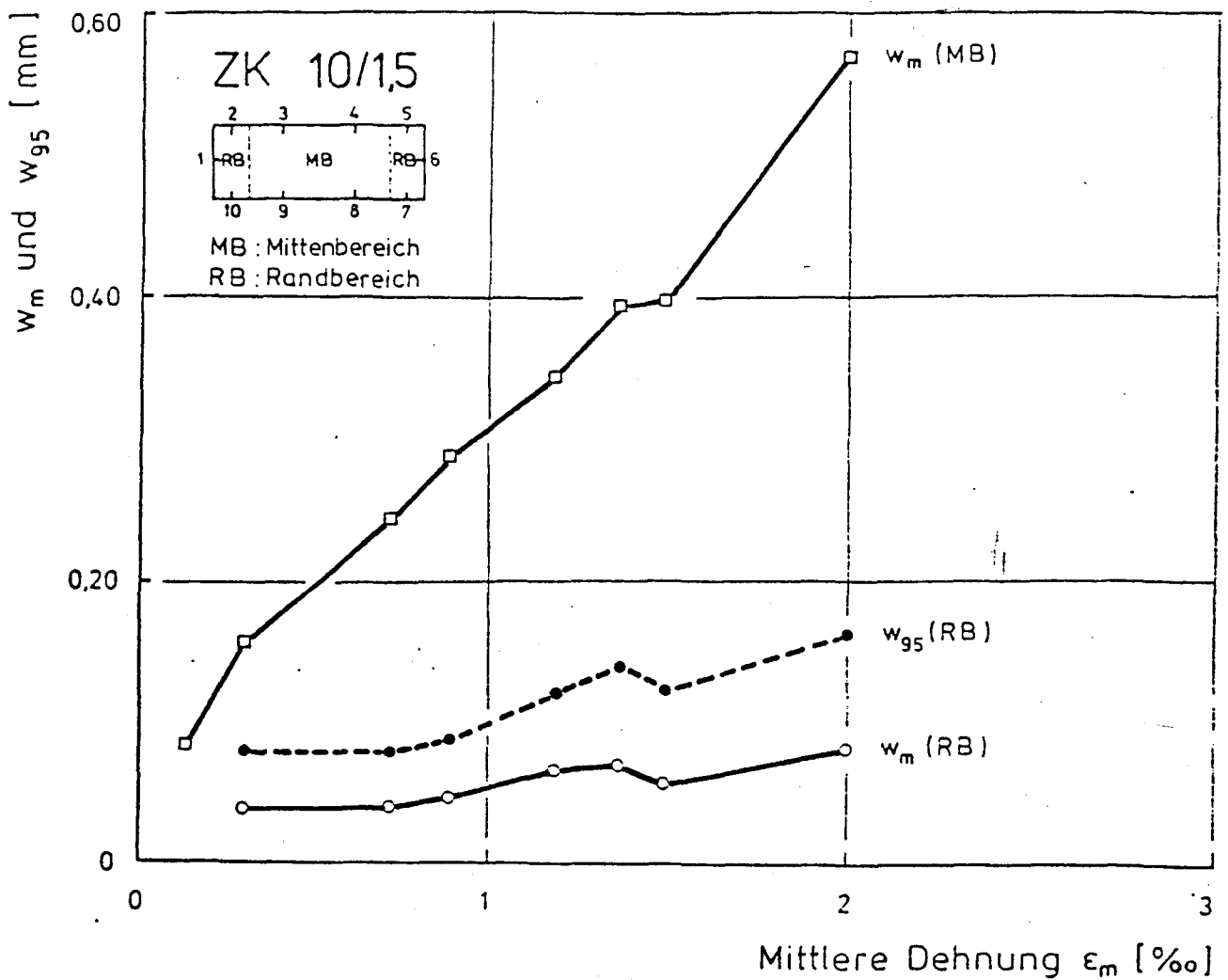


Abbildung 6.35: Mittlere Rißbreite w_m im Randbereich und im Mittenbereich und kritische Rißbreite w_{95} im Randbereich in Abhängigkeit von der mittleren Dehnung ϵ_m für ZK 10/1,5

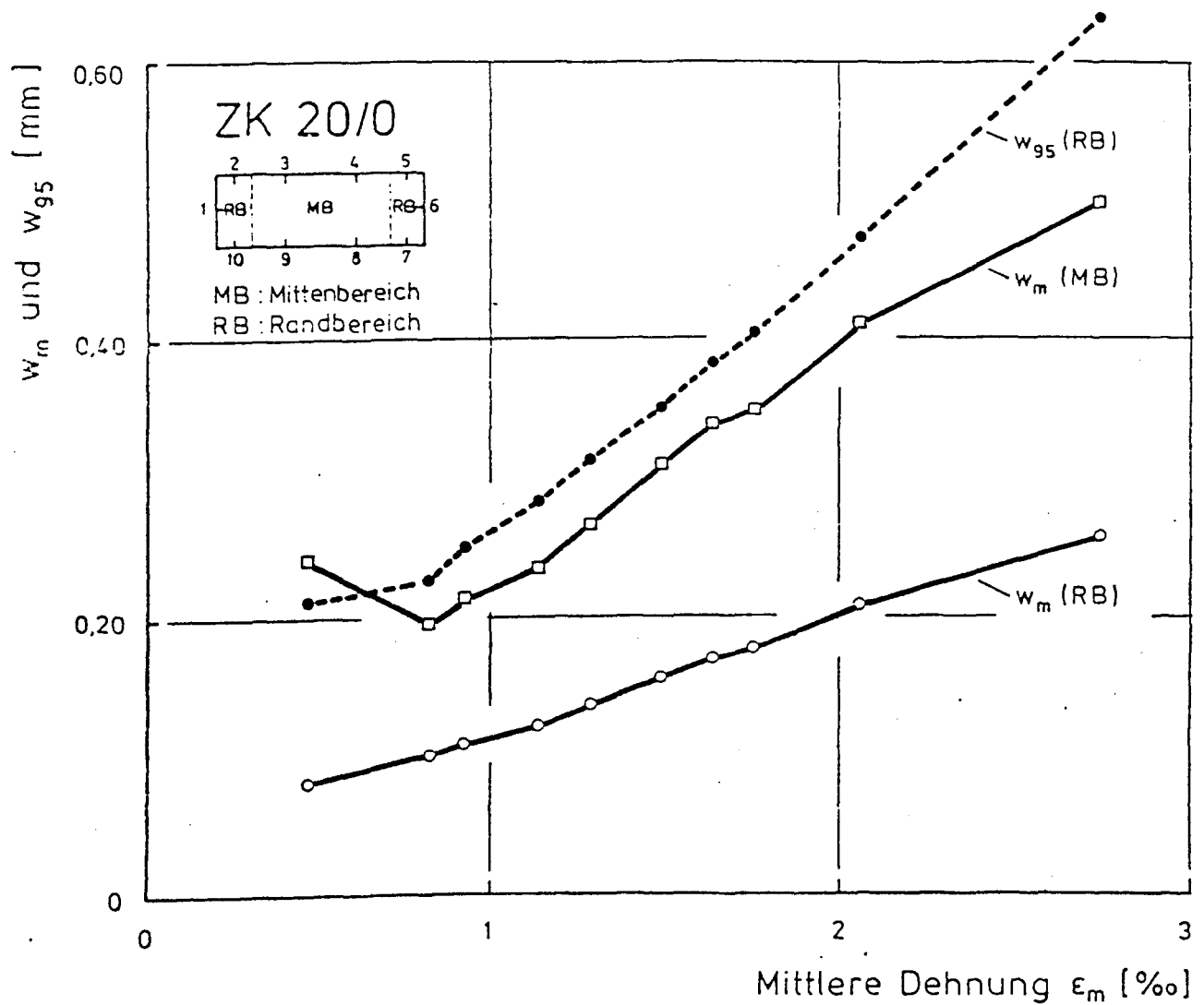


Abbildung 6.36: Mittlere Rißbreite w_m im Randbereich und im Mittenbereich und kritische Rißbreite w_{95} im Randbereich in Abhängigkeit von der mittleren Dehnung ϵ_m für ZK 20/0

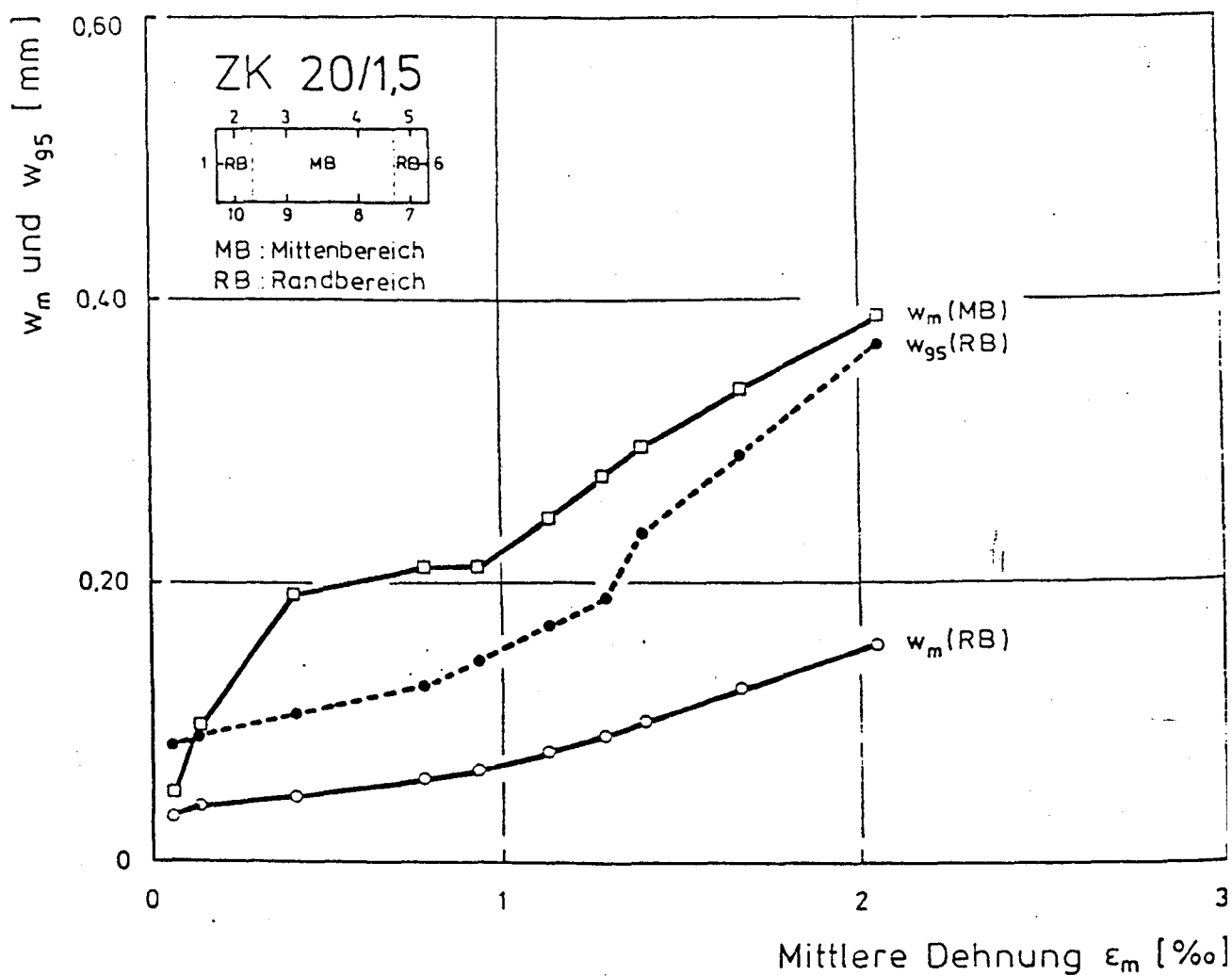


Abbildung 6.37: Mittlere Rißbreite w_m im Randbereich und im Mittenbereich und kritische Rißbreite w_{95} im Randbereich in Abhängigkeit von der mittleren Dehnung ϵ_m für ZK 20/1,5

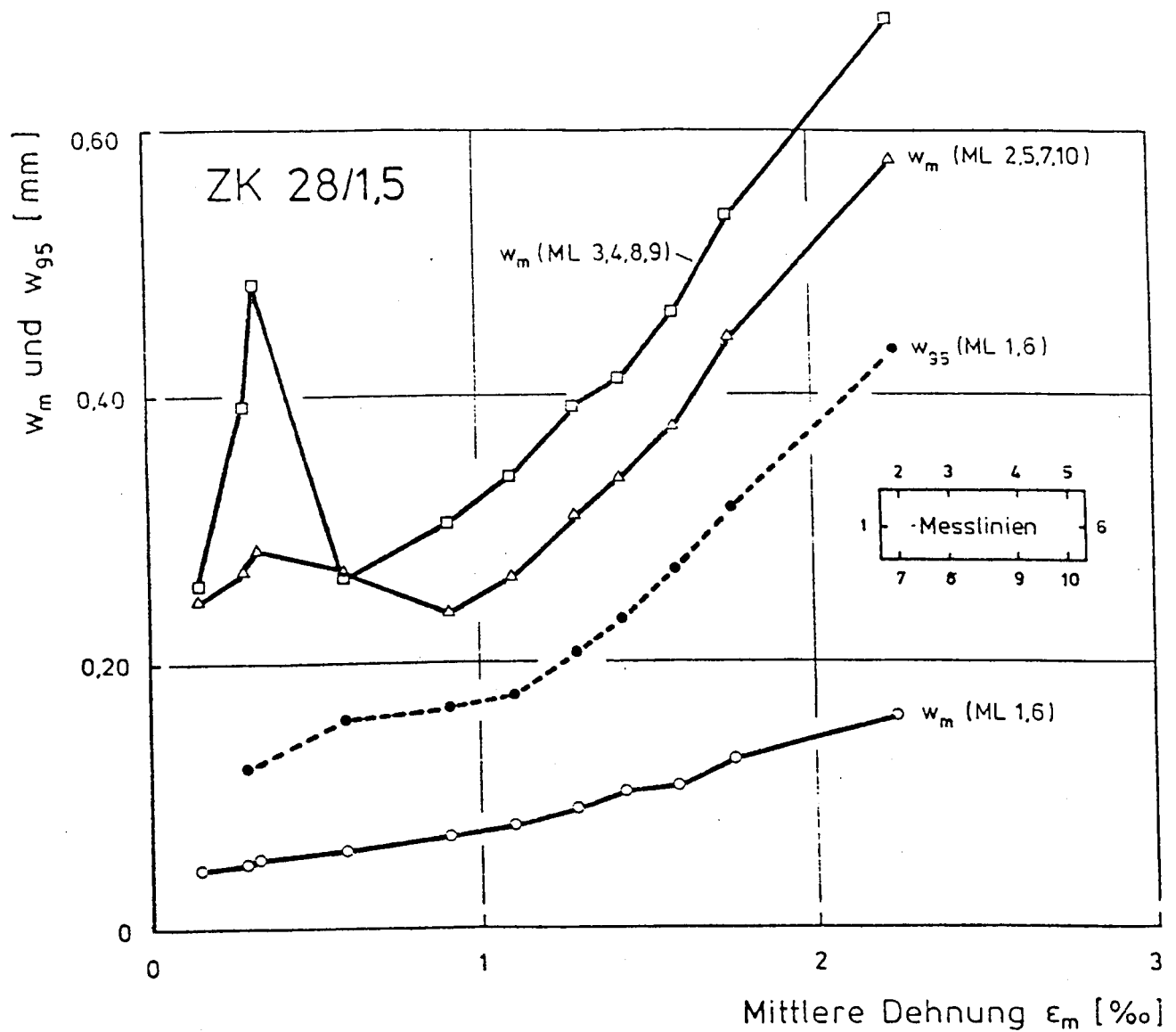


Abbildung 6.38: Mittlere Rißbreite w_m und kritische Rißbreite w_{95} für verschiedene Meßliniengruppen in Abhängigkeit von der mittleren Dehnung ϵ_m für ZK 28/1,5

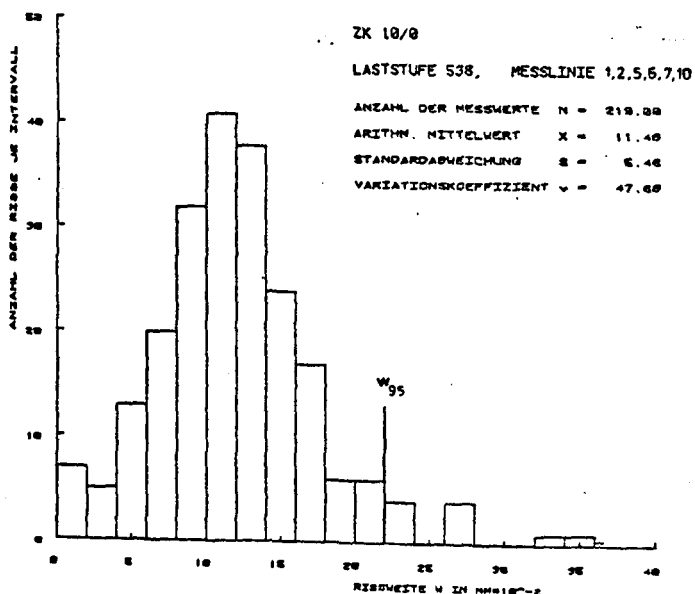
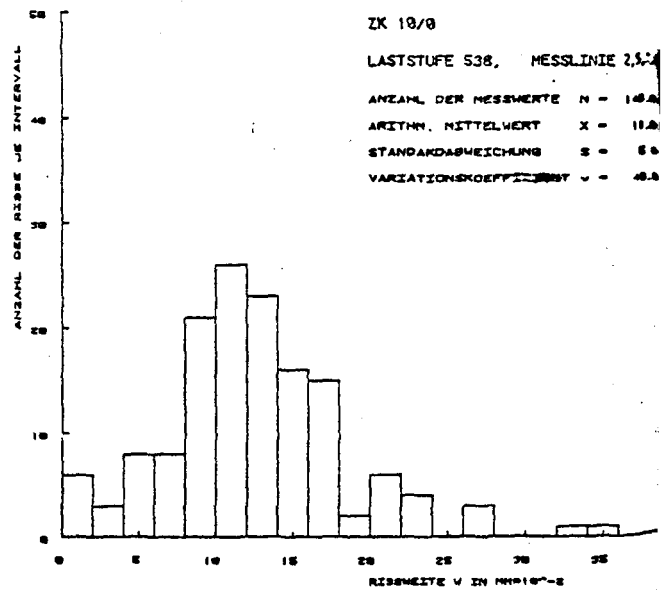
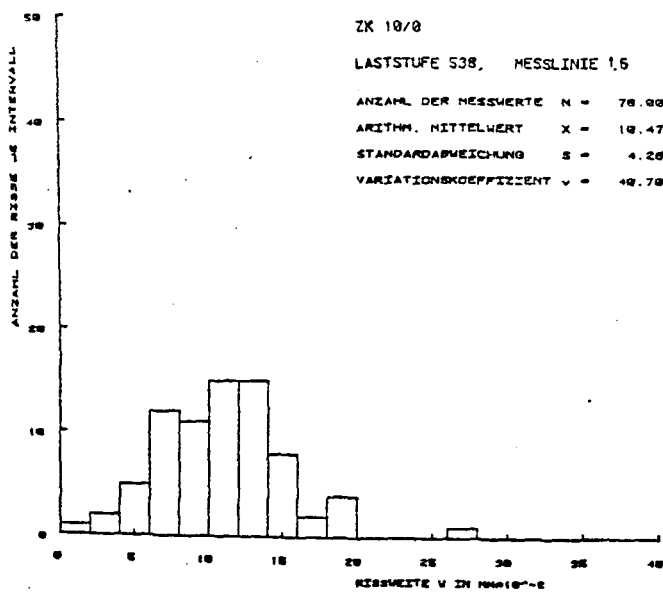


Abbildung 6.39: Statistische Verteilung der Rißbreiten in der höchsten Laststufe in Abhängigkeit von der Meßlinie, Versuchskörper ZK 10/0

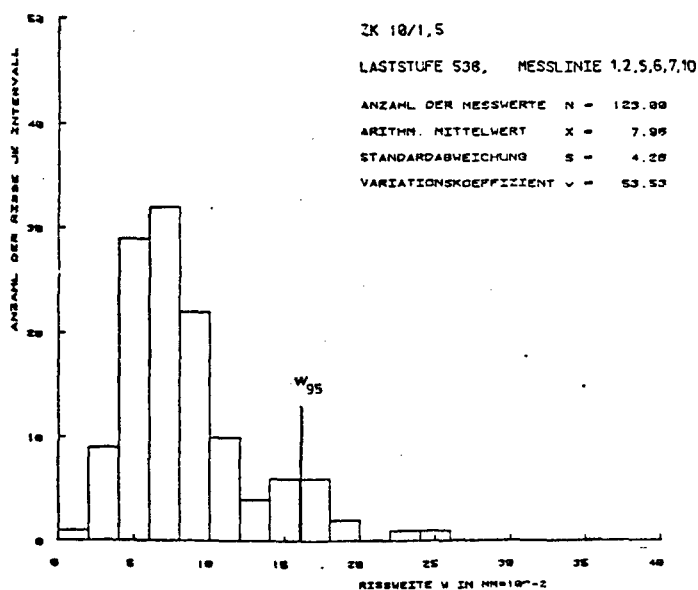
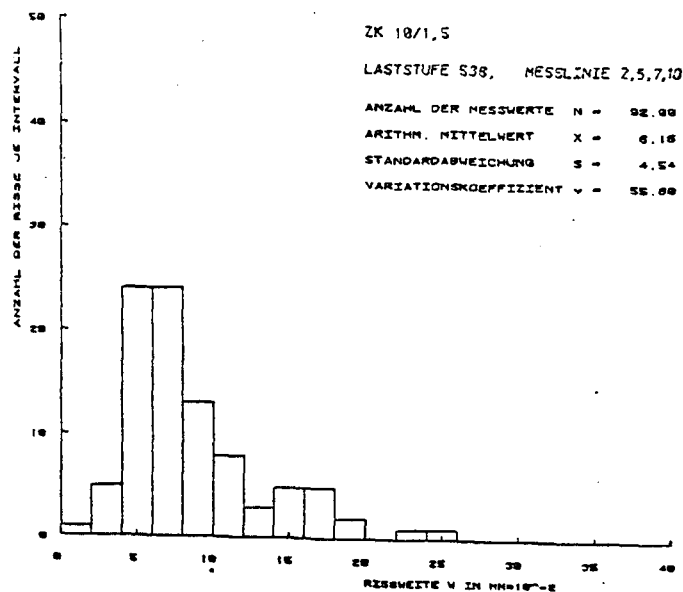
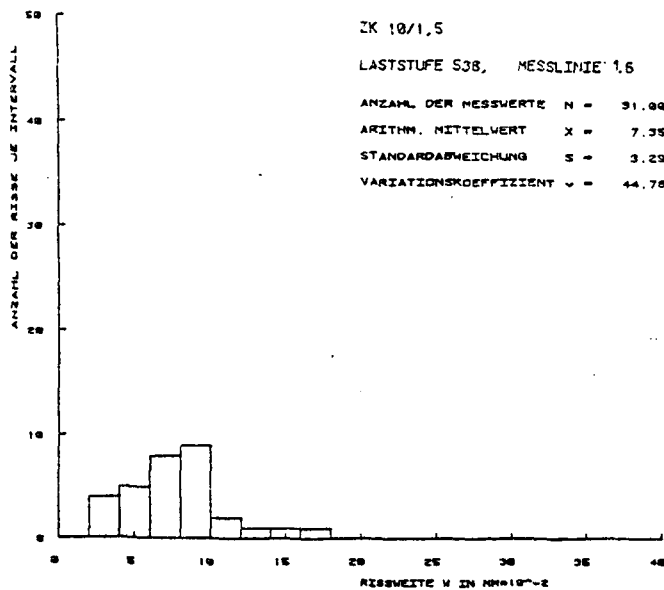


Abbildung 6.40: Statistische Verteilung der Rißbreiten in der höchsten Laststufe in Abhängigkeit von der Meßlinie, Versuchskörper ZK 10/1,5

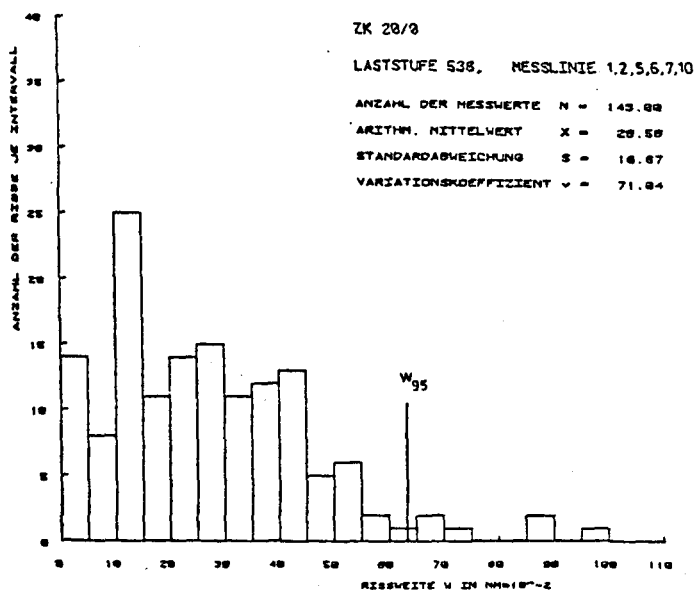
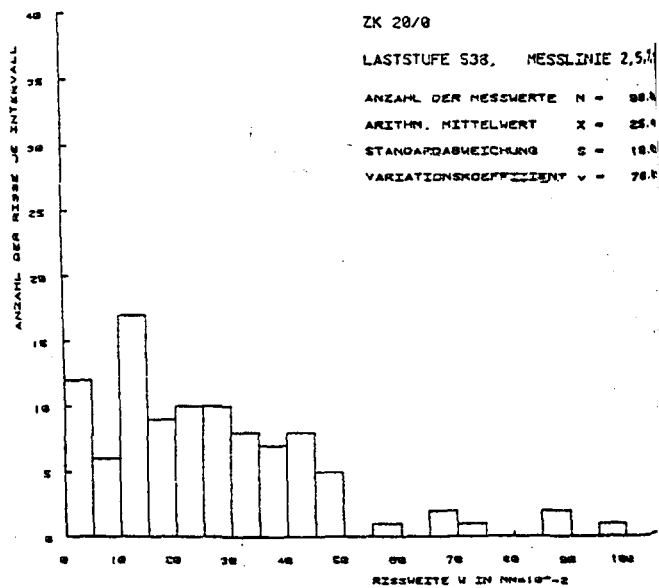
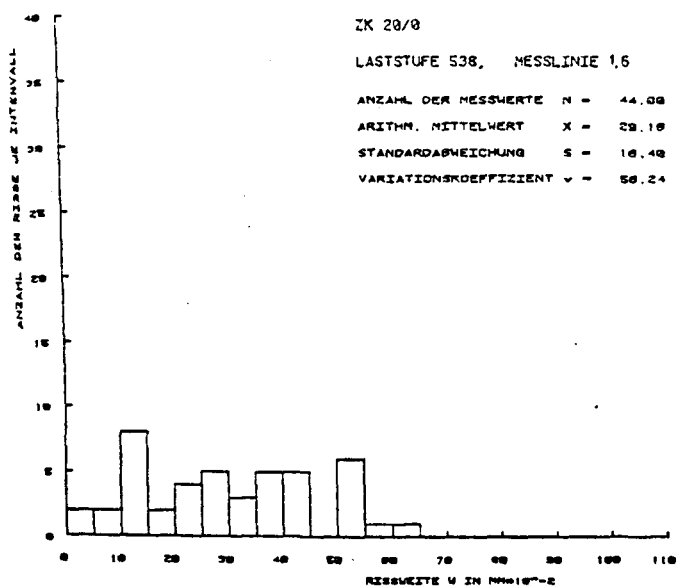


Abbildung 6.41: Statistische Verteilung der Rißbreiten in der höchsten Laststufe in Abhängigkeit von der Meßlinie, Versuchskörper ZK 20/0

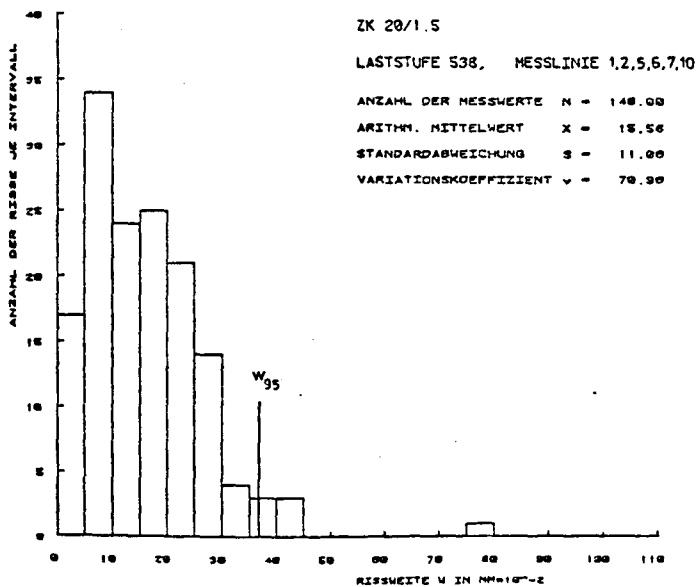
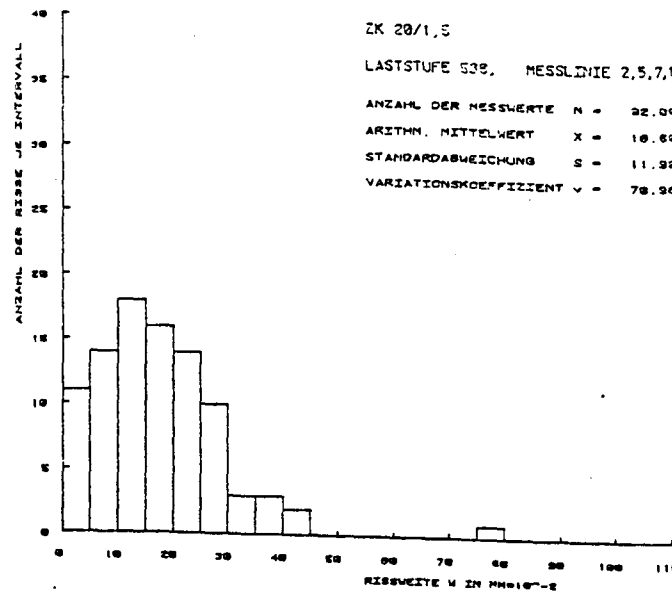
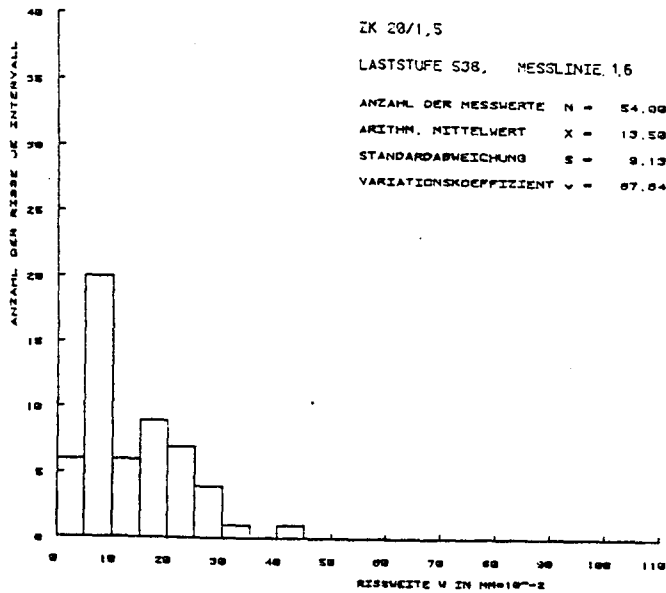


Abbildung 6.42: Statistische Verteilung der Rißbreiten in der höchsten Laststufe in Abhängigkeit von der Meßlinie, Versuchskörper ZK 20/1,5

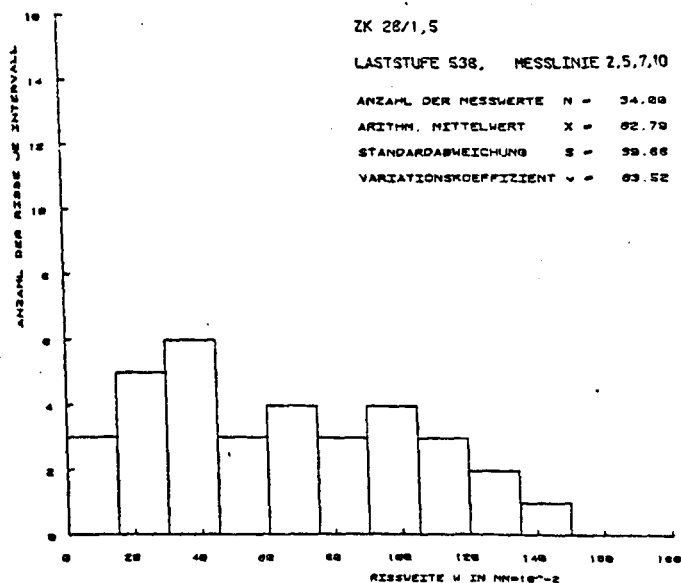
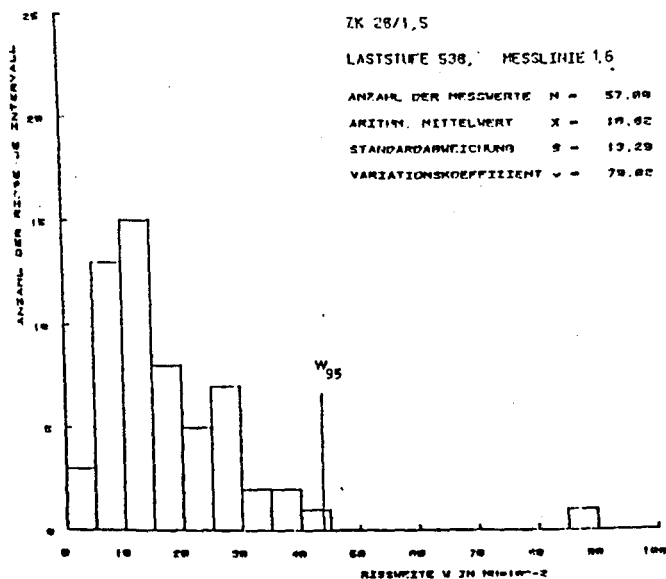


Abbildung 6.43: Statistische Verteilung der Rißbreiten in der höchsten Laststufe in Abhängigkeit von der Meßlinie, Versuchskörper ZK 28/1,5

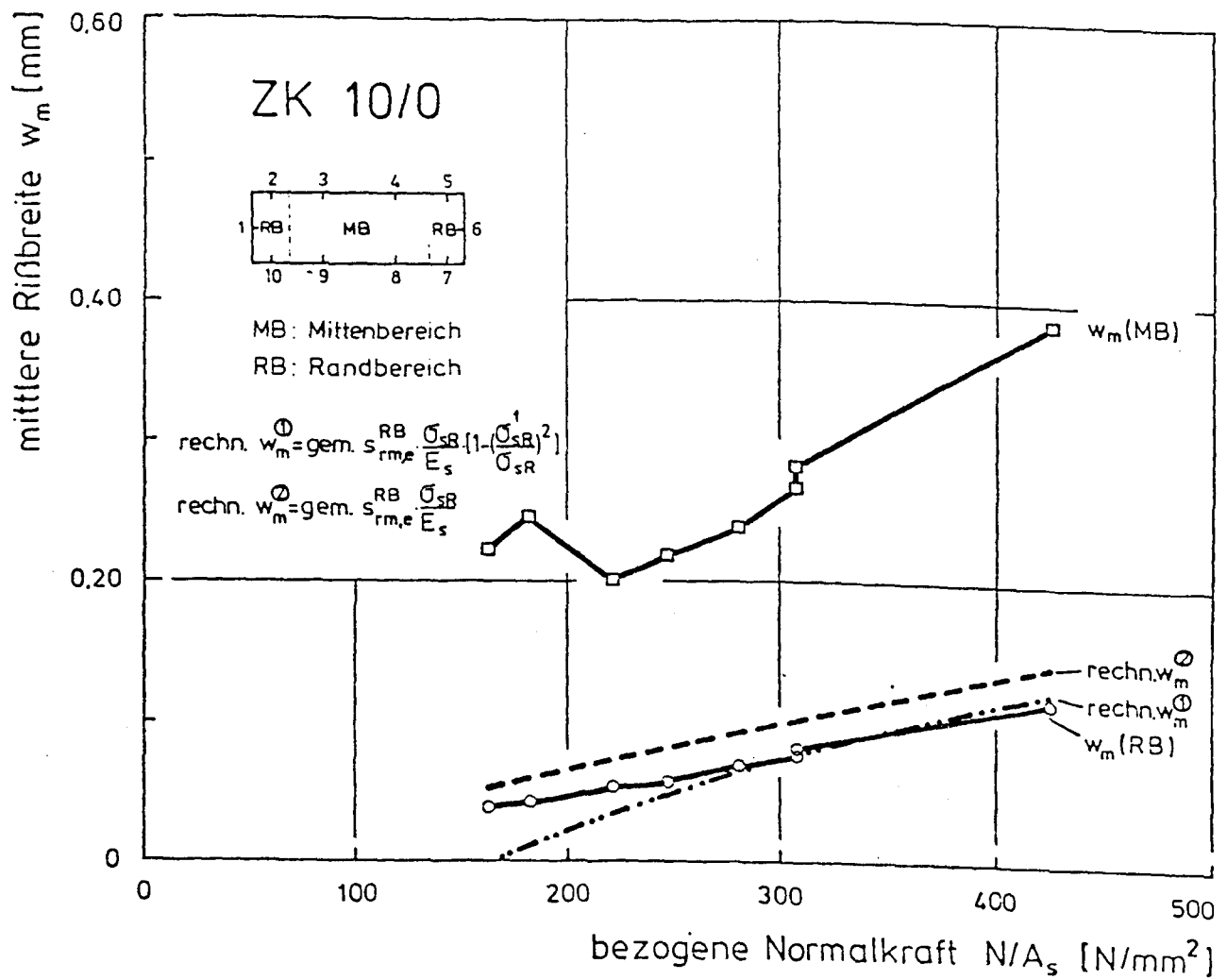


Abbildung 6.44: Gemessene und rechnerische mittlere Rißbreite, Versuchskörper ZK 10/0

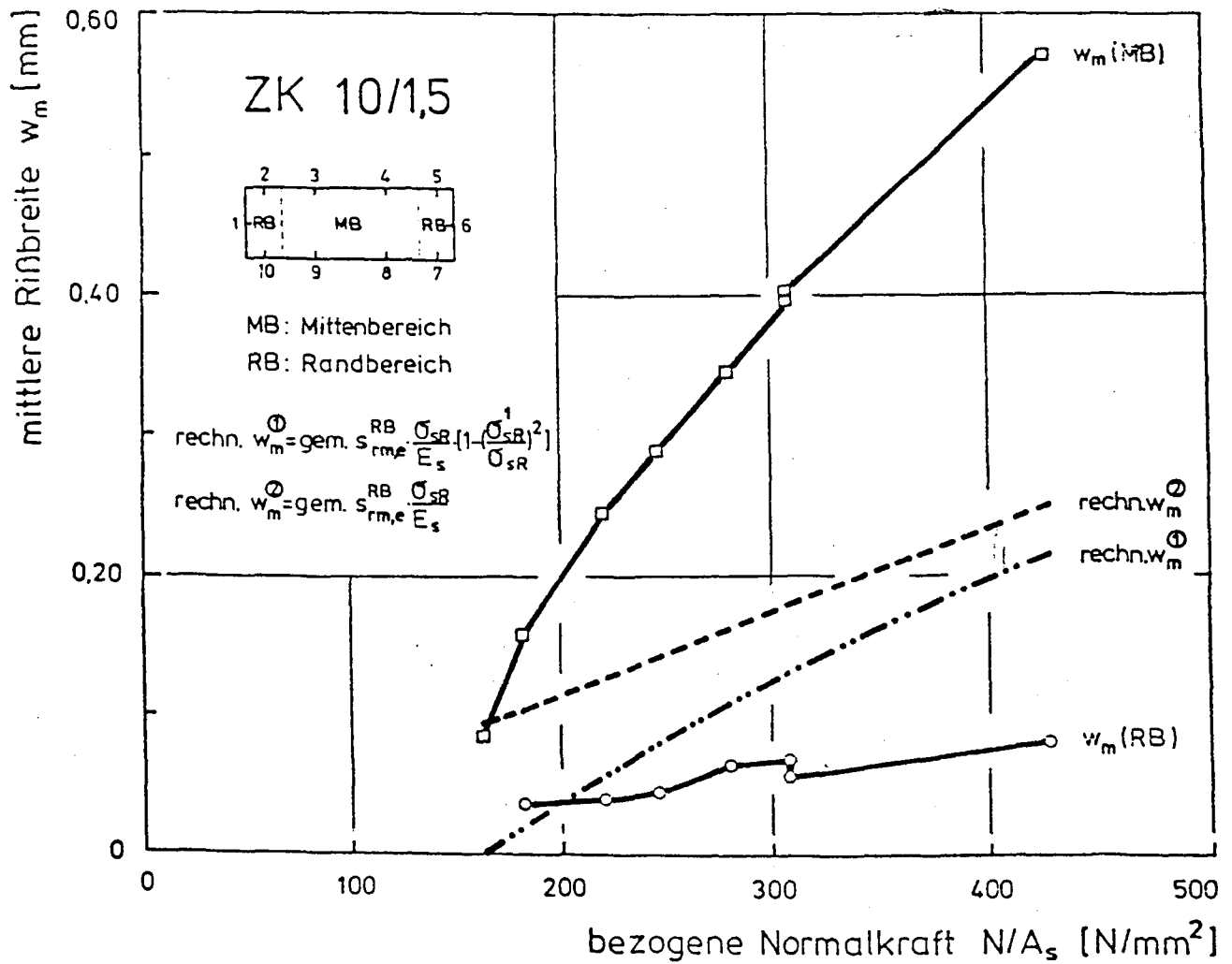


Abbildung 6.45: Gemessene und rechnerische mittlere Rißbreite, Versuchskörper ZK 10/1,5

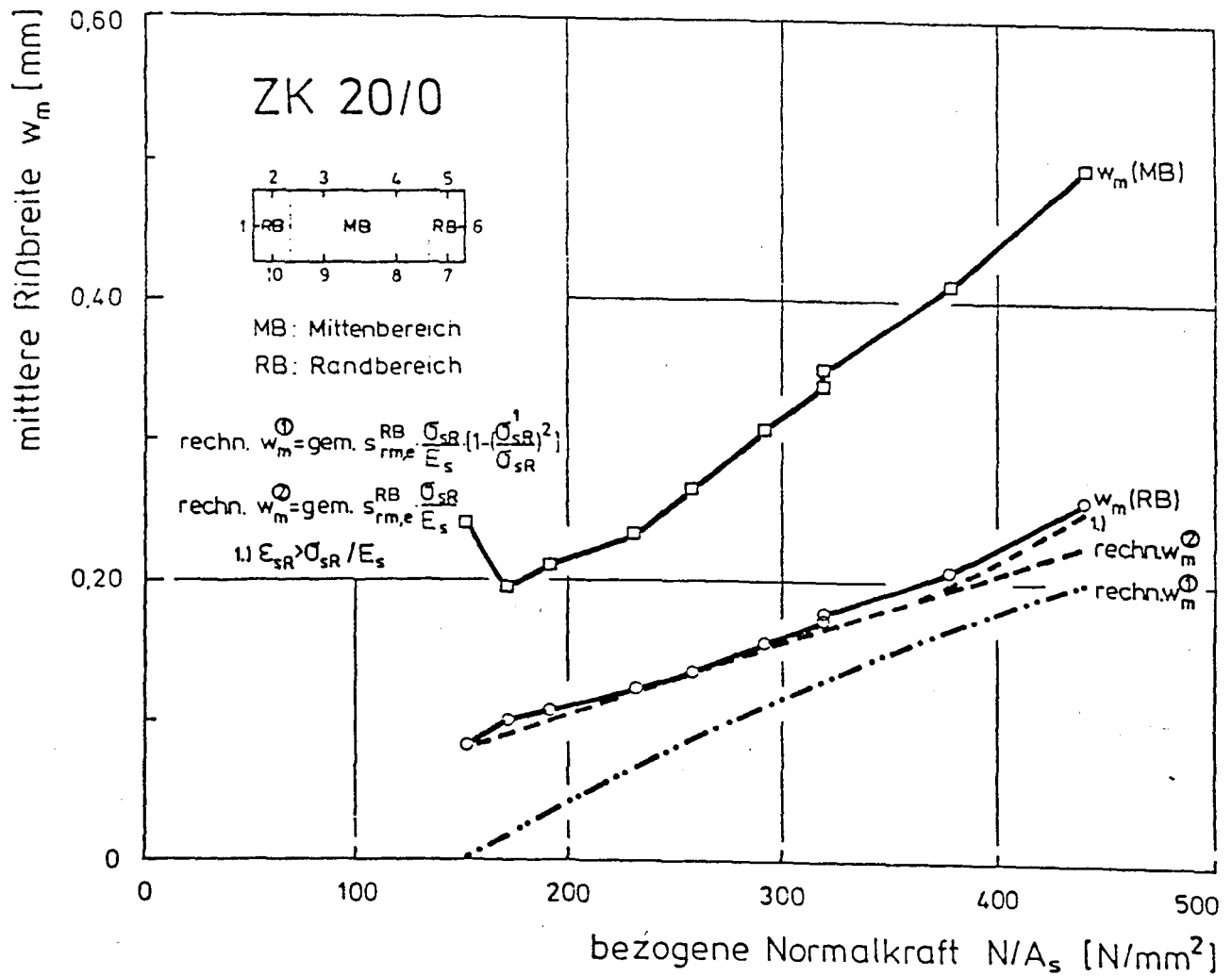


Abbildung 6.46: Gemessene und rechnerische mittlere Rißbreite, Versuchskörper ZK 20/0

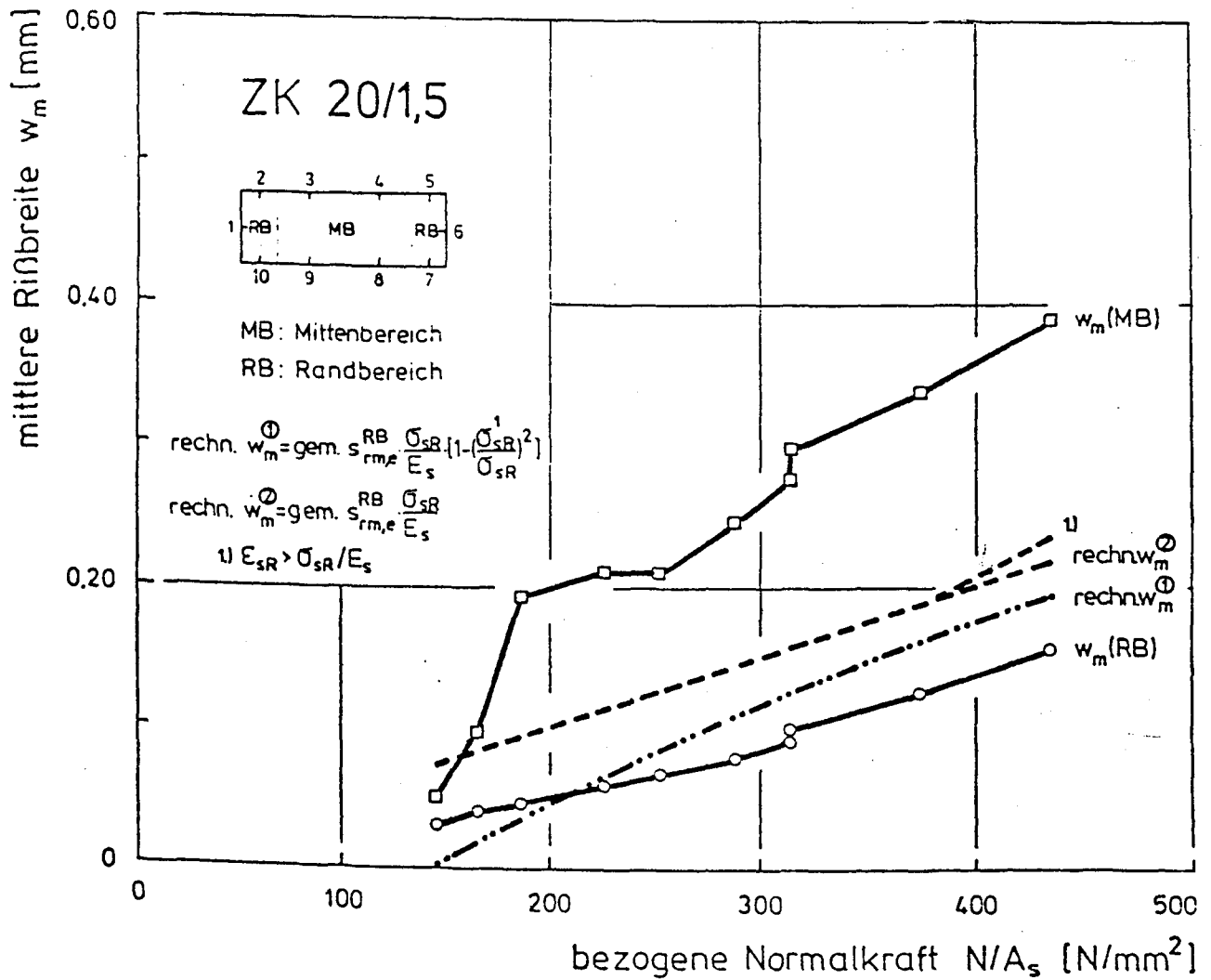


Abbildung 6.47: Gemessene und rechnerische mittlere Rißbreite, Versuchskörper ZK 20/1,5

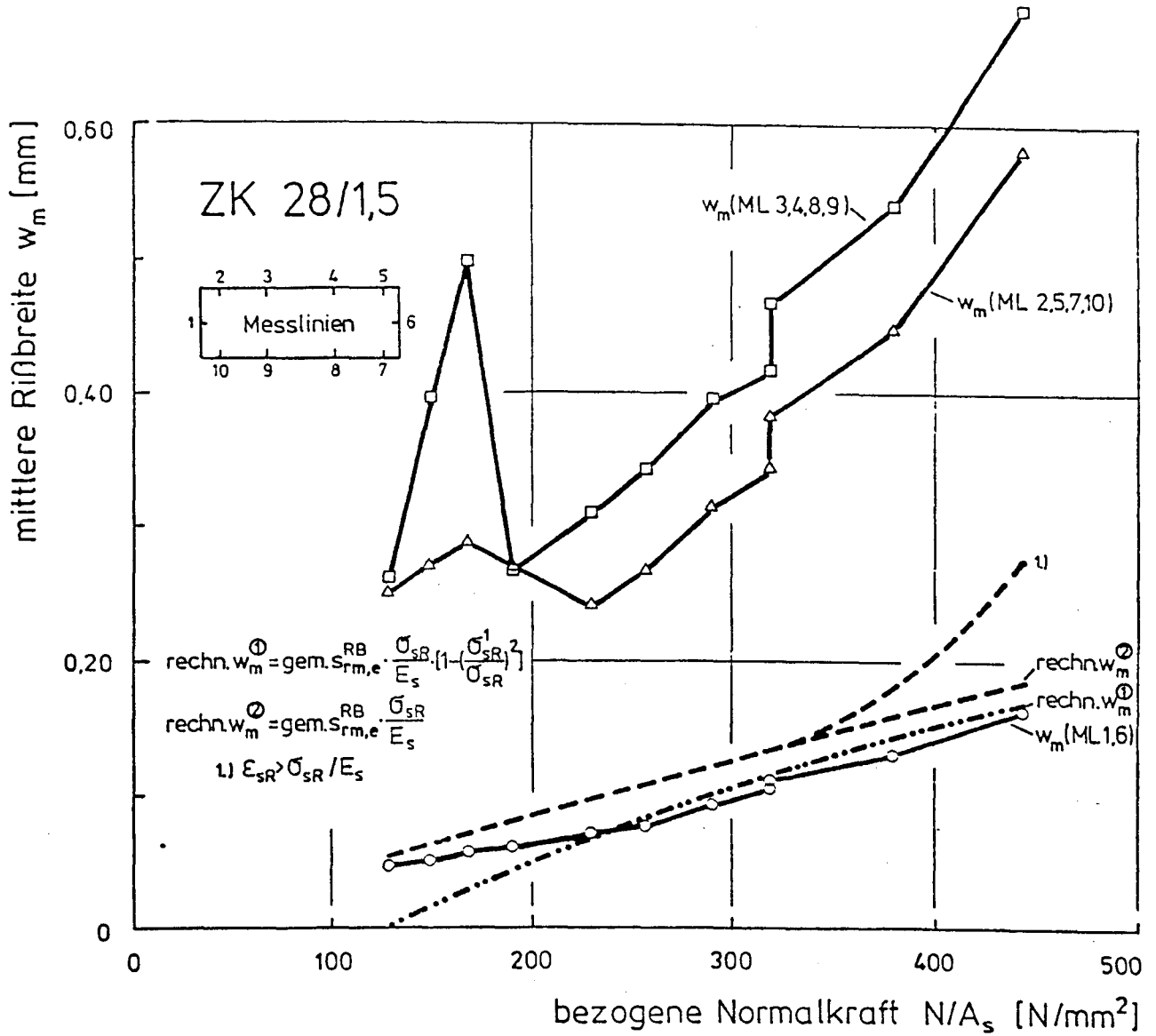


Abbildung 6.48: Gemessene und rechnerische mittlere Rißbreite, Versuchskörper ZK 28/1,5

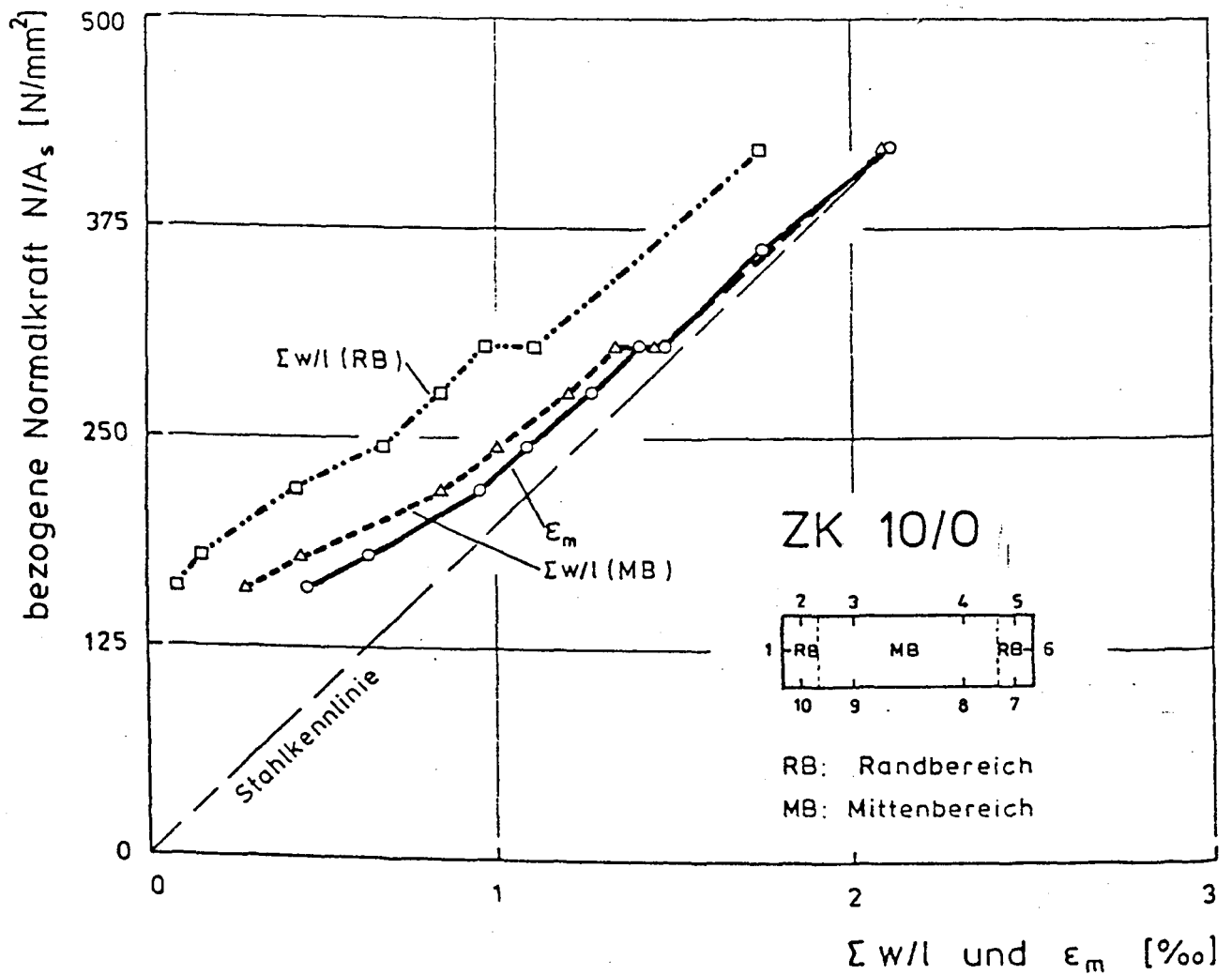


Abbildung 6.49: Vergleich der bezogenen Rißbreitensummen $\Sigma w/l$ und mittlere Dehnung des Versuchskörpers in Abhängigkeit von der Belastung, Versuchskörper ZK 10/0

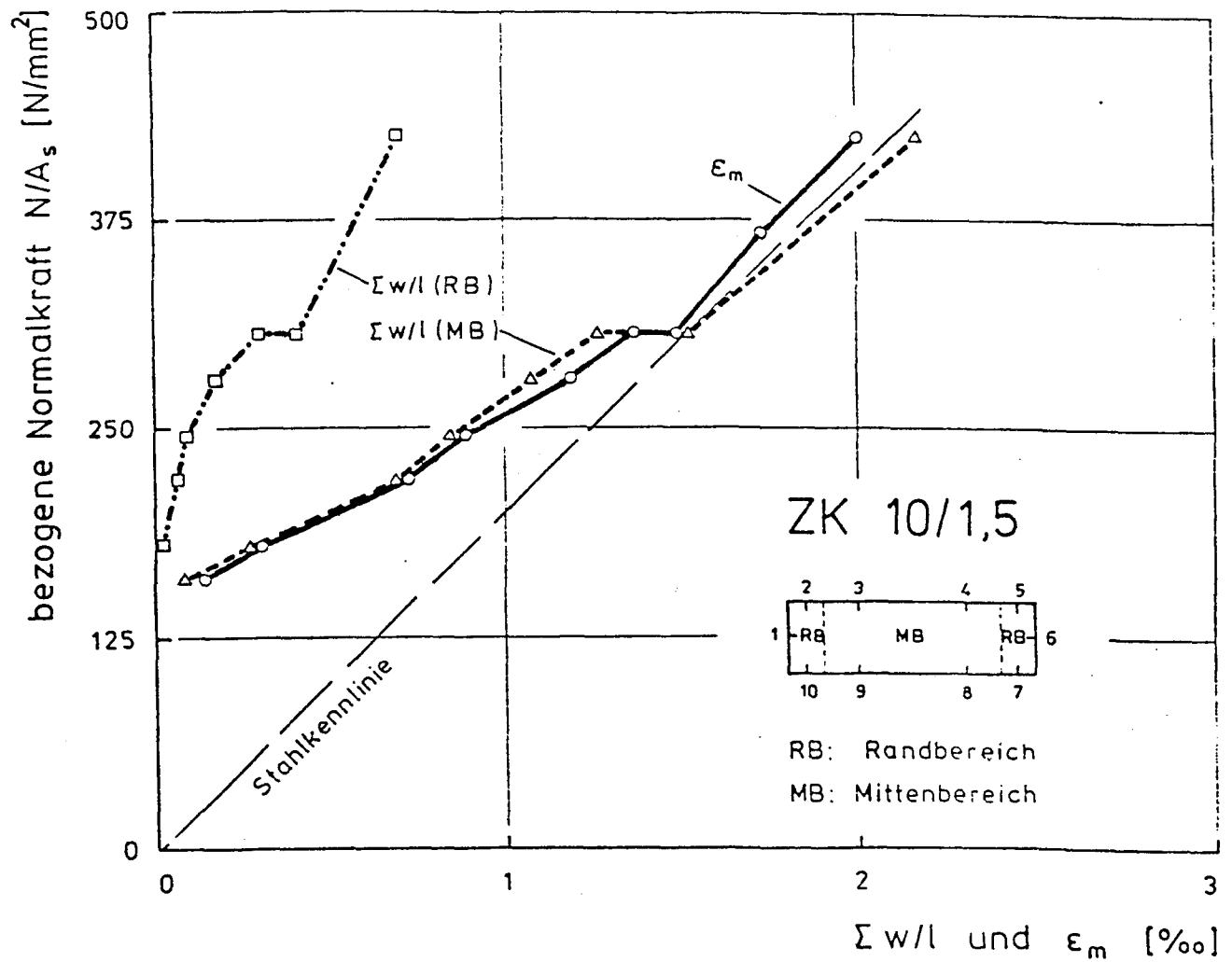


Abbildung 6.50: Vergleich der bezogenen Rißbreitensummen $\Sigma w/l$ und mittlere Dehnung des Versuchskörpers in Abhängigkeit von der Belastung, Versuchskörper ZK 10/1,5

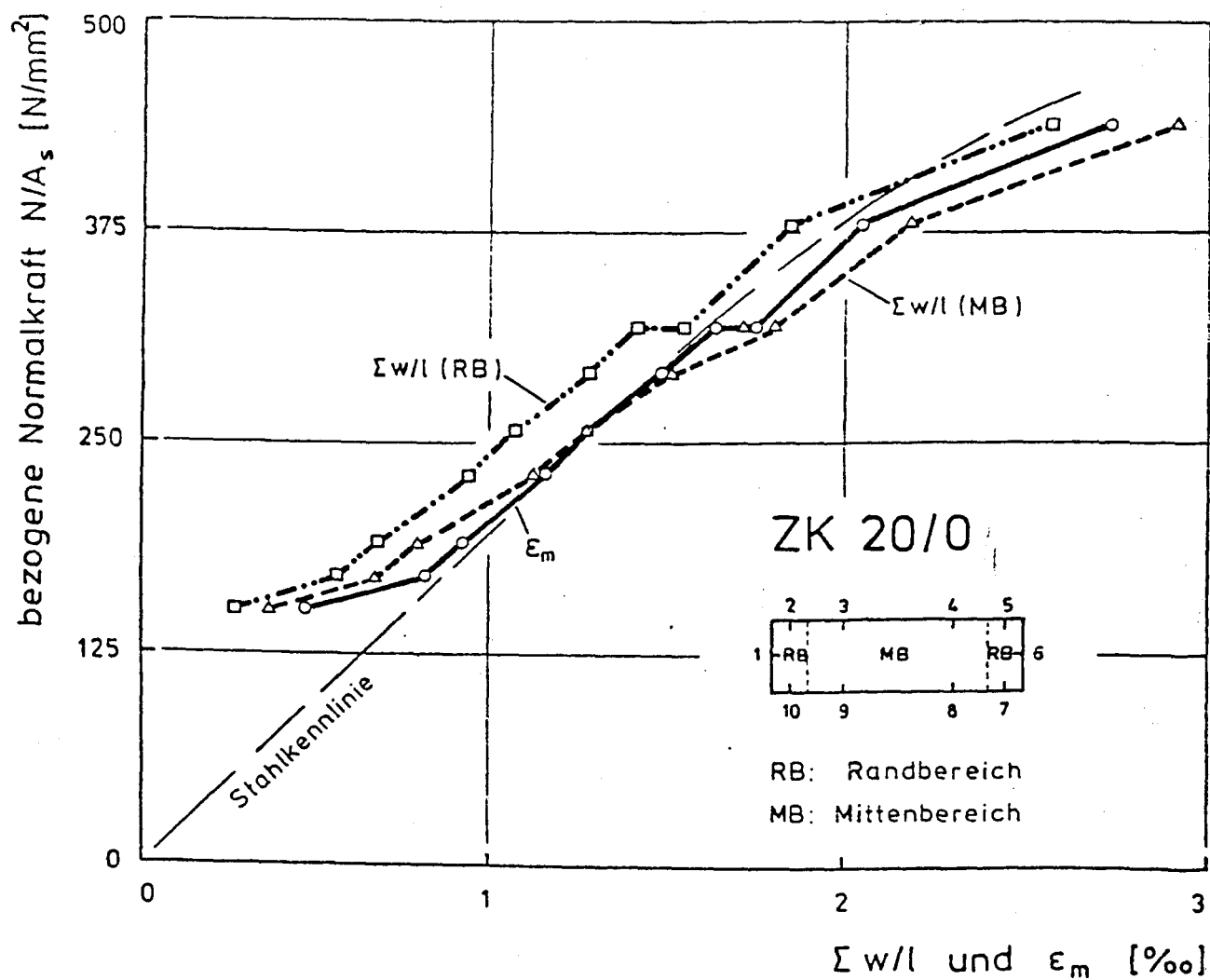


Abbildung 6.51: Vergleich der bezogenen Rißbreitensummen $\Sigma w/l$ und mittlere Dehnung des Versuchskörpers in Abhängigkeit von der Belastung, Versuchskörper ZK 20/0

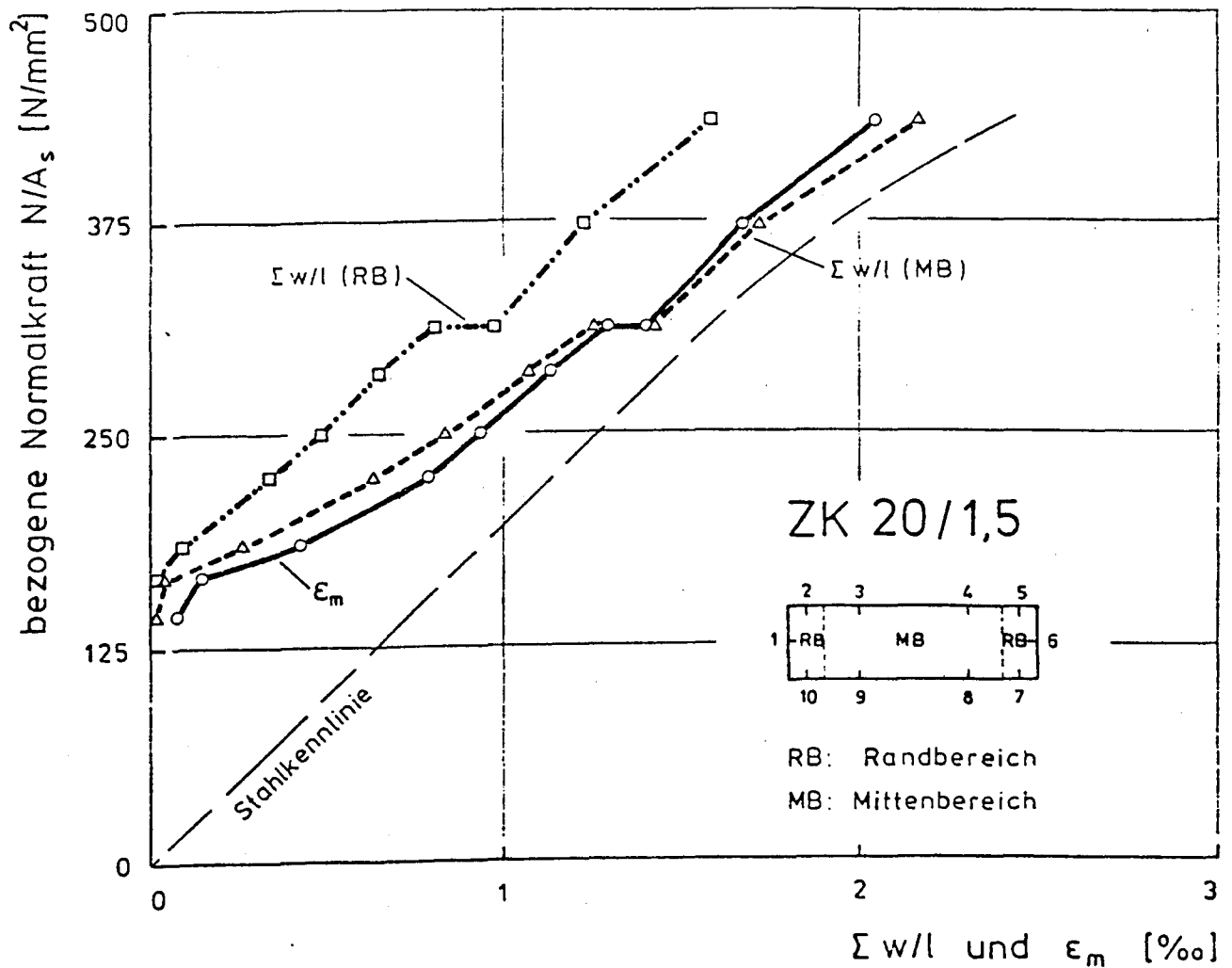


Abbildung 6.52: Vergleich der bezogenen Rißbreitensummen $\Sigma w/l$ und mittlere Dehnung des Versuchskörpers in Abhängigkeit von der Belastung, Versuchskörper ZK 20/1,5

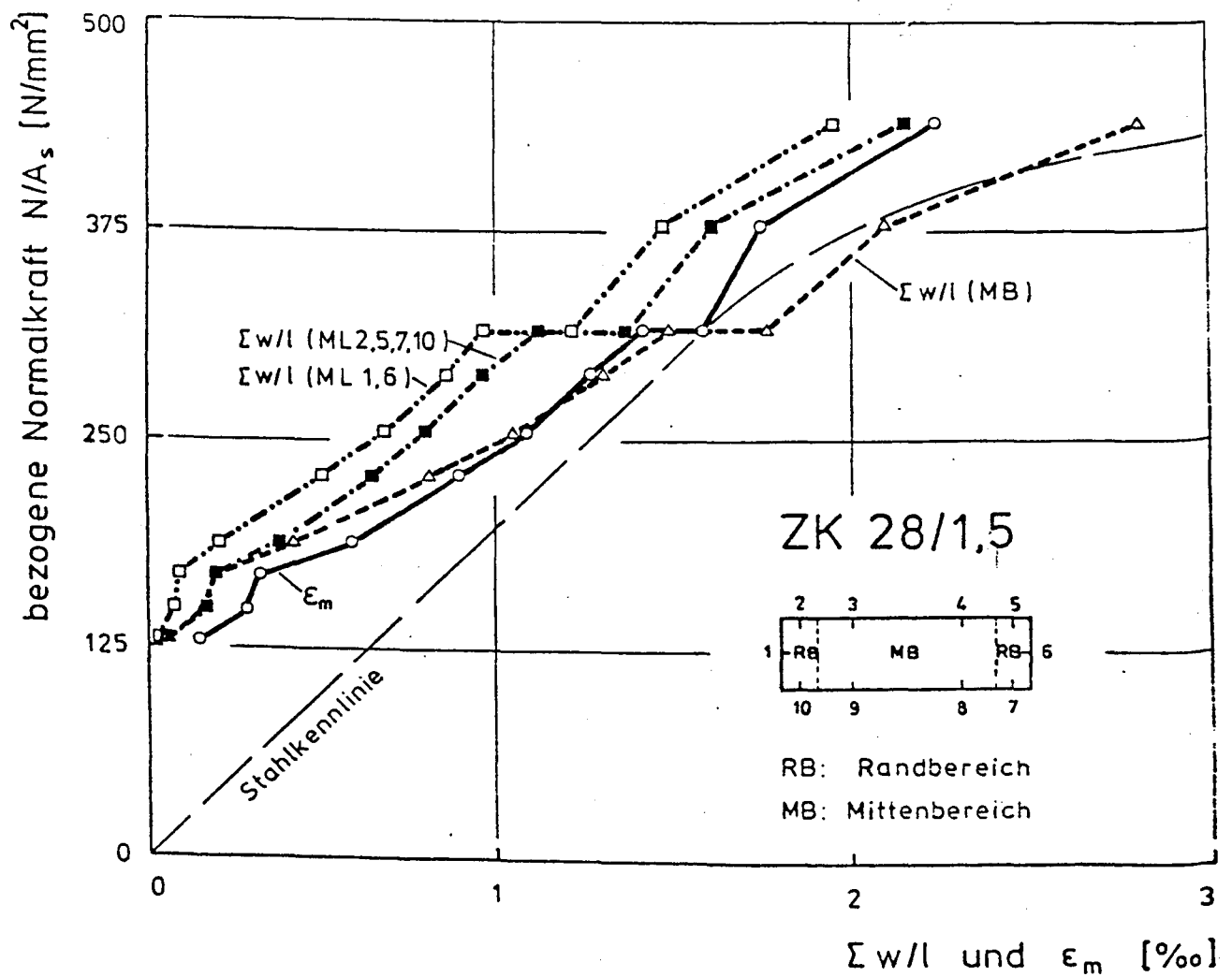


Abbildung 6.53: Vergleich der bezogenen Rißbreitensummen $\Sigma w/l$ und mittlere Dehnung des Versuchskörpers in Abhängigkeit von der Belastung, Versuchskörper ZK 28/1,5

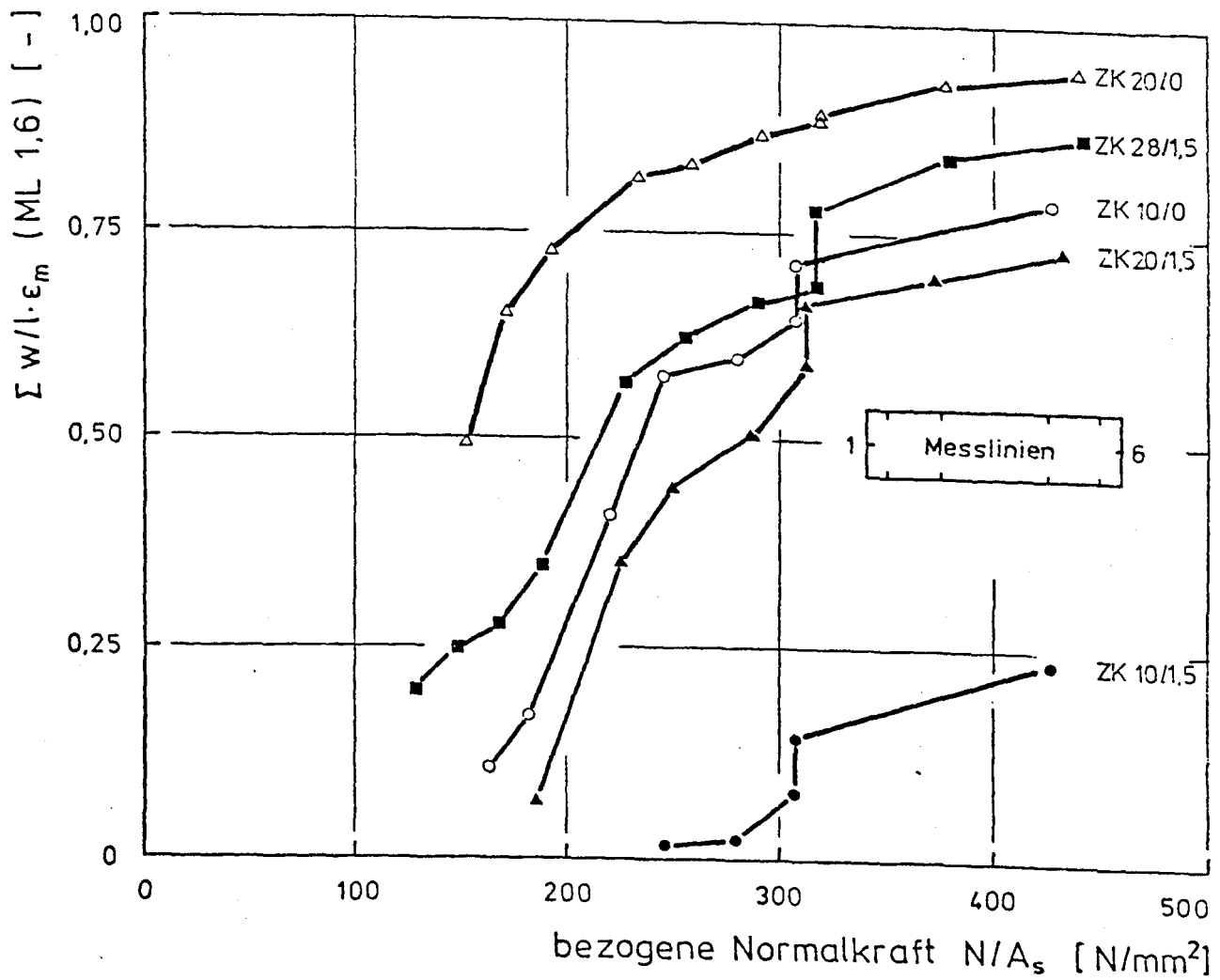
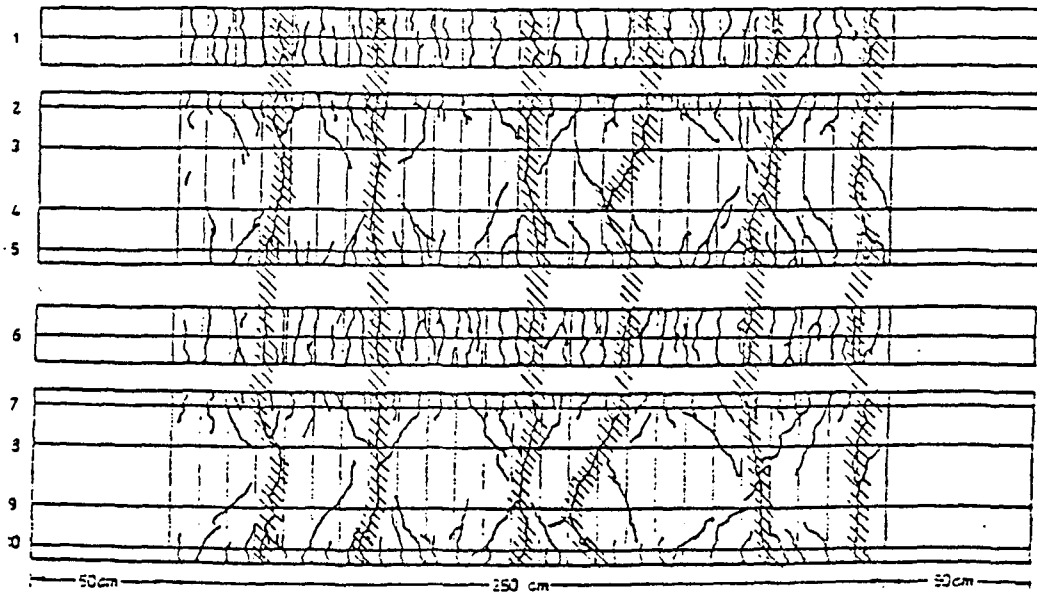


Abbildung 6.54: Anteil der bezogenen Rißbreitensumme $\Sigma w/l$ auf den Meßlinien 1 und 6 an der mittleren Dehnung ϵ_m

Trennrisse: A B C D E F



Trennriss C

Trennriss E

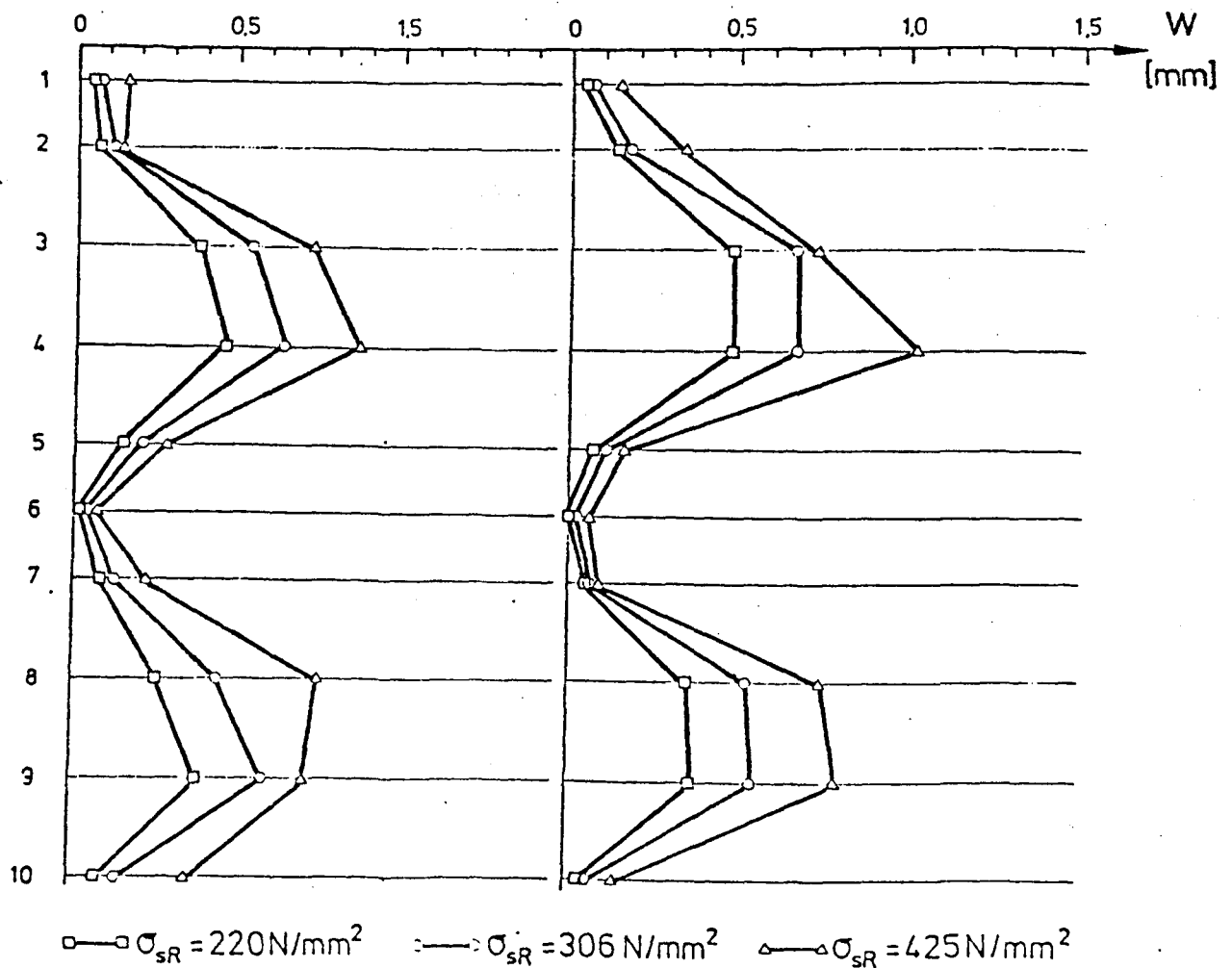


Abbildung 6.55: Kennzeichnung der Trennrisse, Breite zweier Trenn-

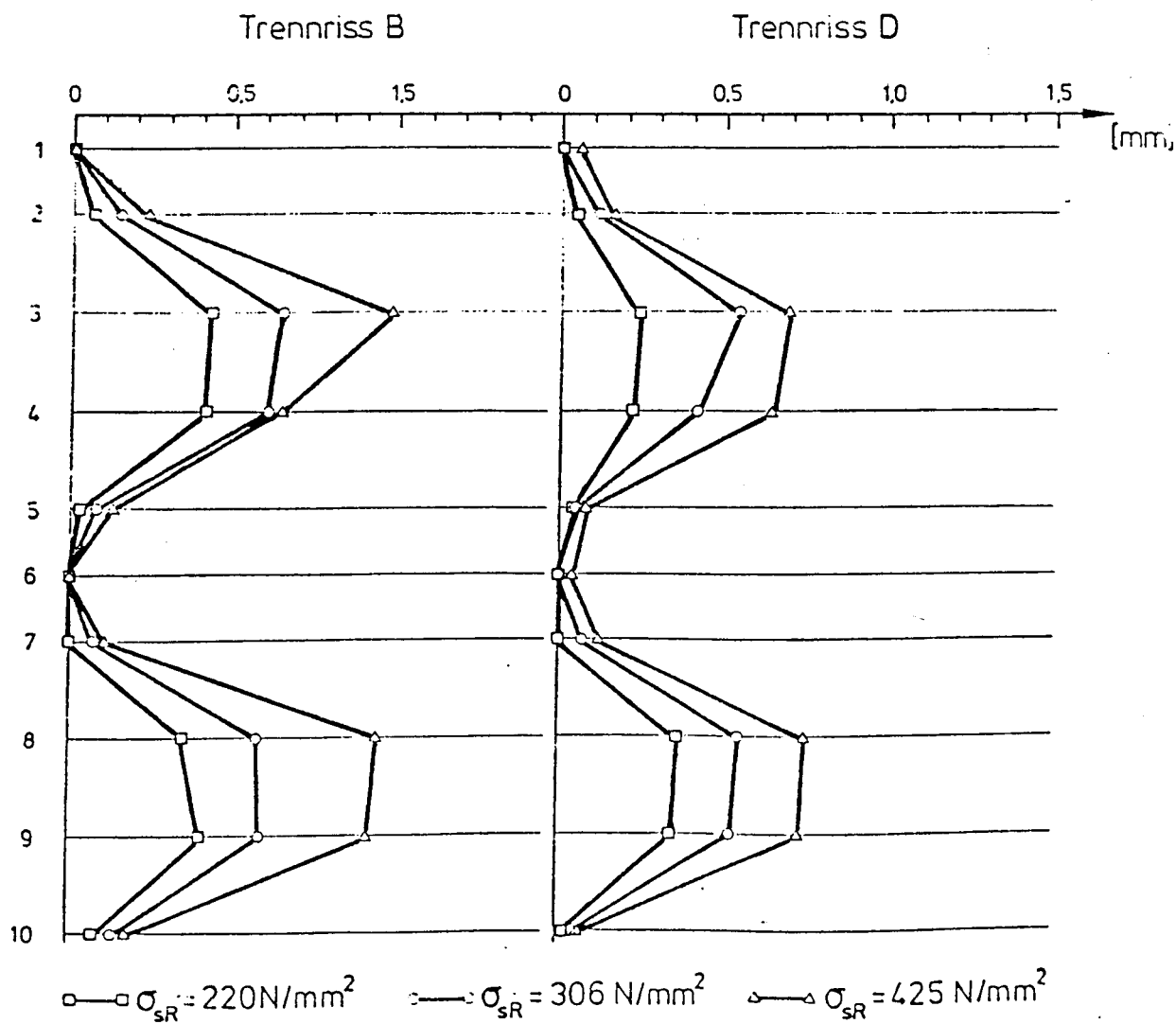
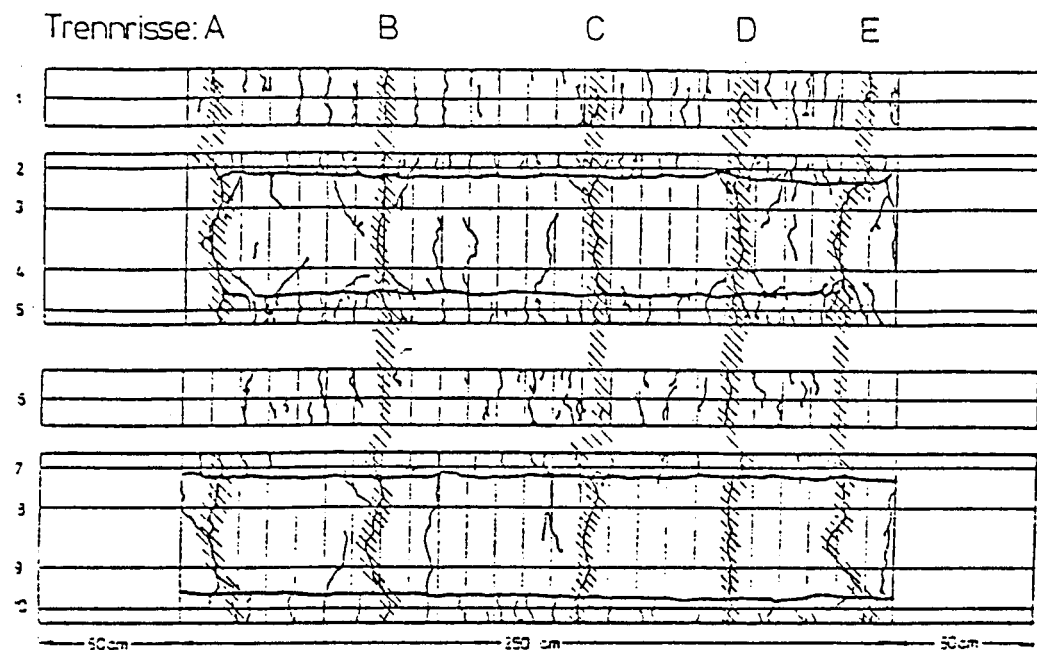
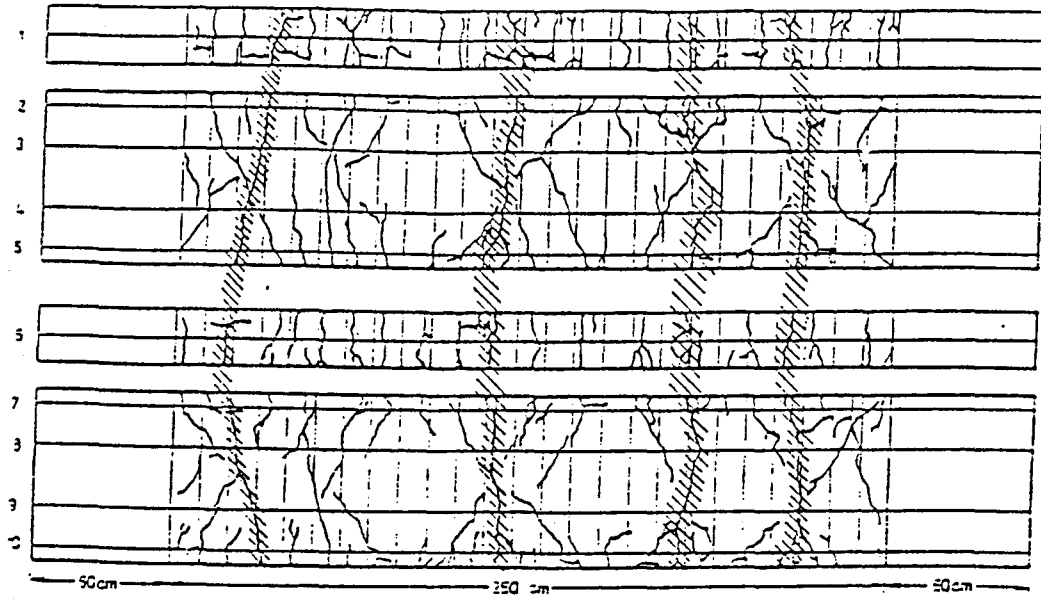


Abbildung 6.56: Kennzeichnung der Trennrisse, Breite zweier Trennrisse über den Umfang; Versuchskörper ZK10/1,5

Trennrisse: A C B D



Trennriss A

Trennriss B

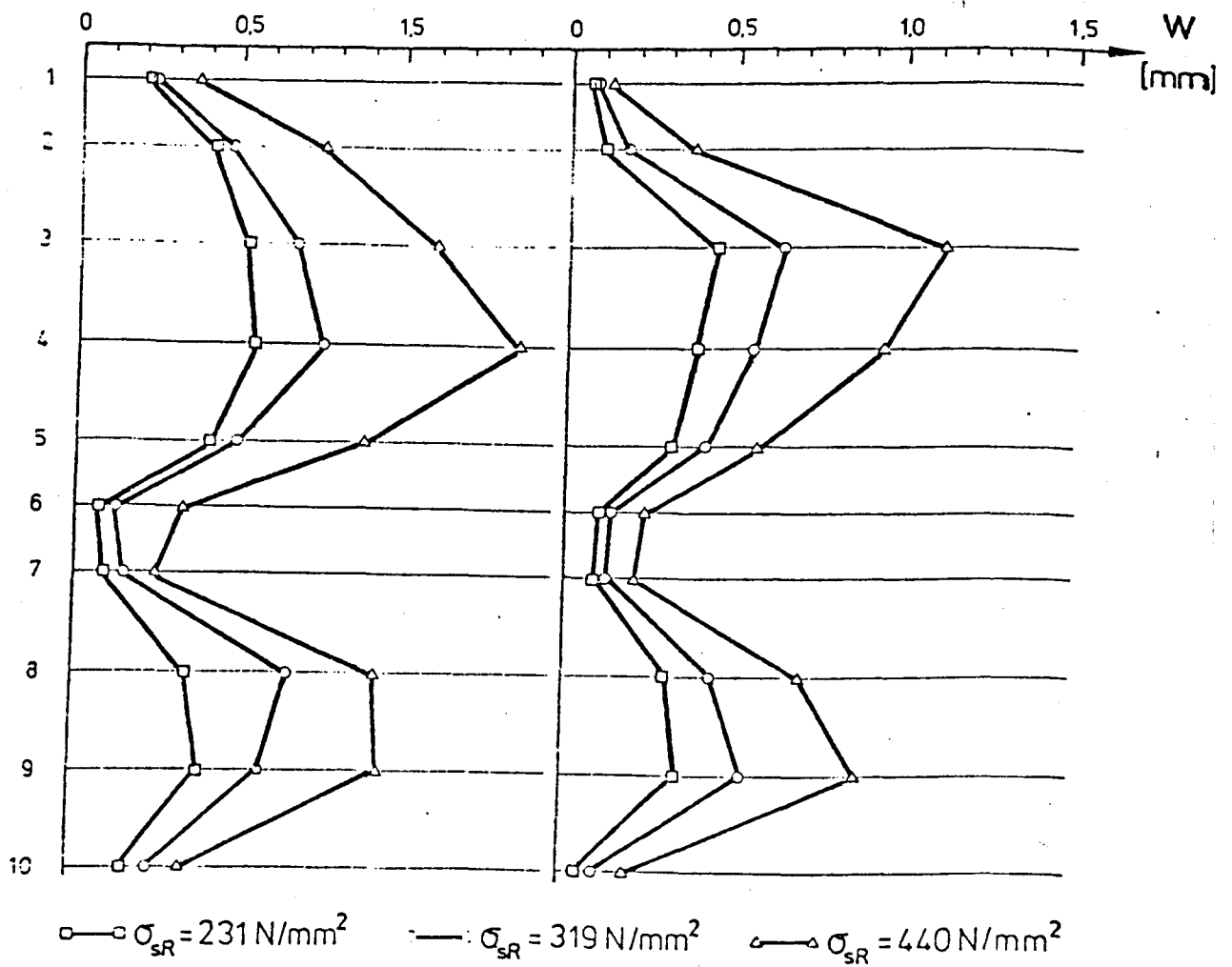
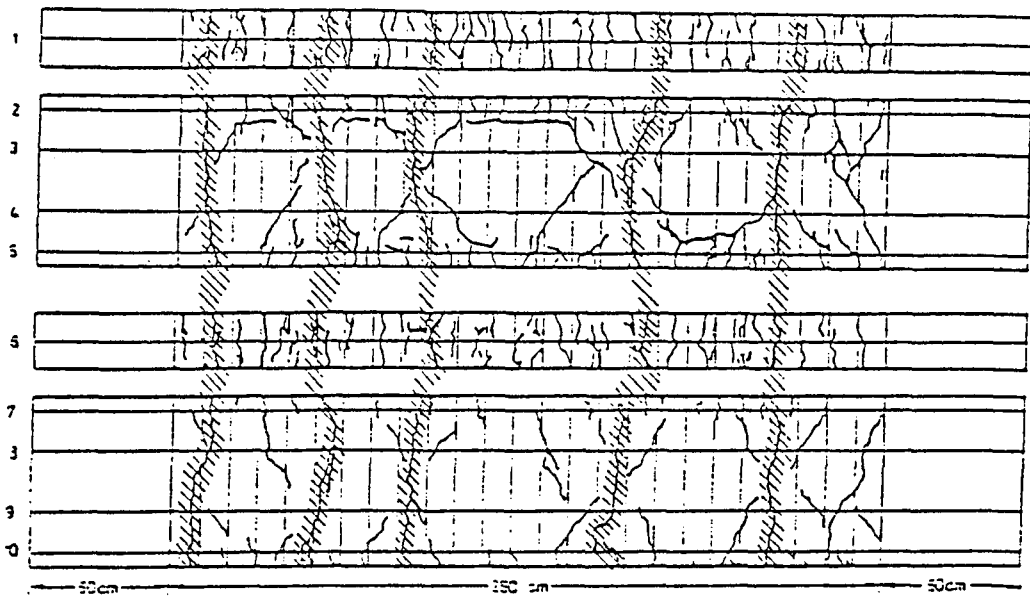


Abbildung 6.57: Kennzeichnung der Trennrisse, Breite zweier Trennrisse über den Umfang; Versuchskörper ZK20/0

Trennrisse: A B C D E



Trennriss B

Trennriss E

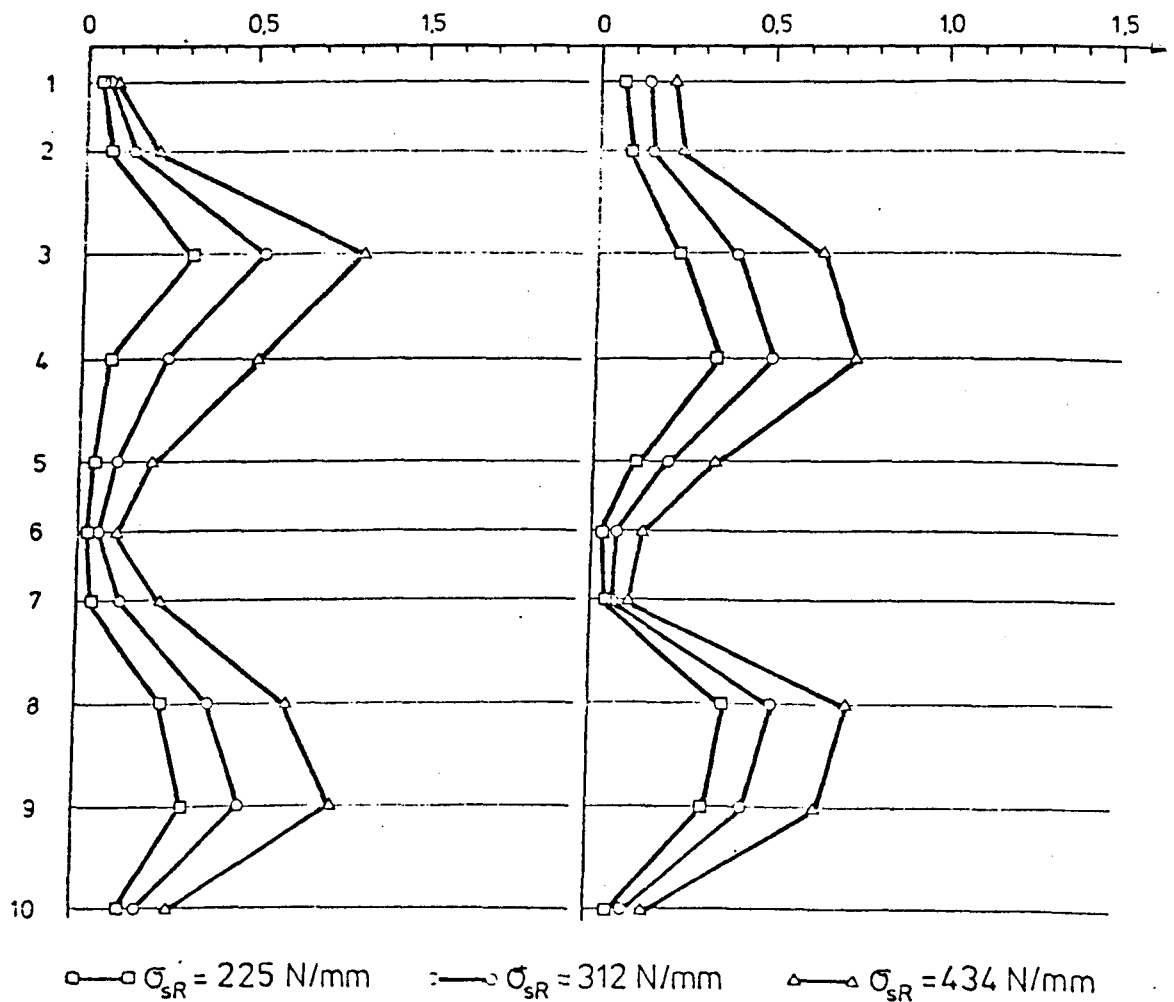


Abbildung 6.58: Kennzeichnung der Trennrisse, Breite zweier Trennrisse über den Umfang; Versuchskörper ZK 20/1,5

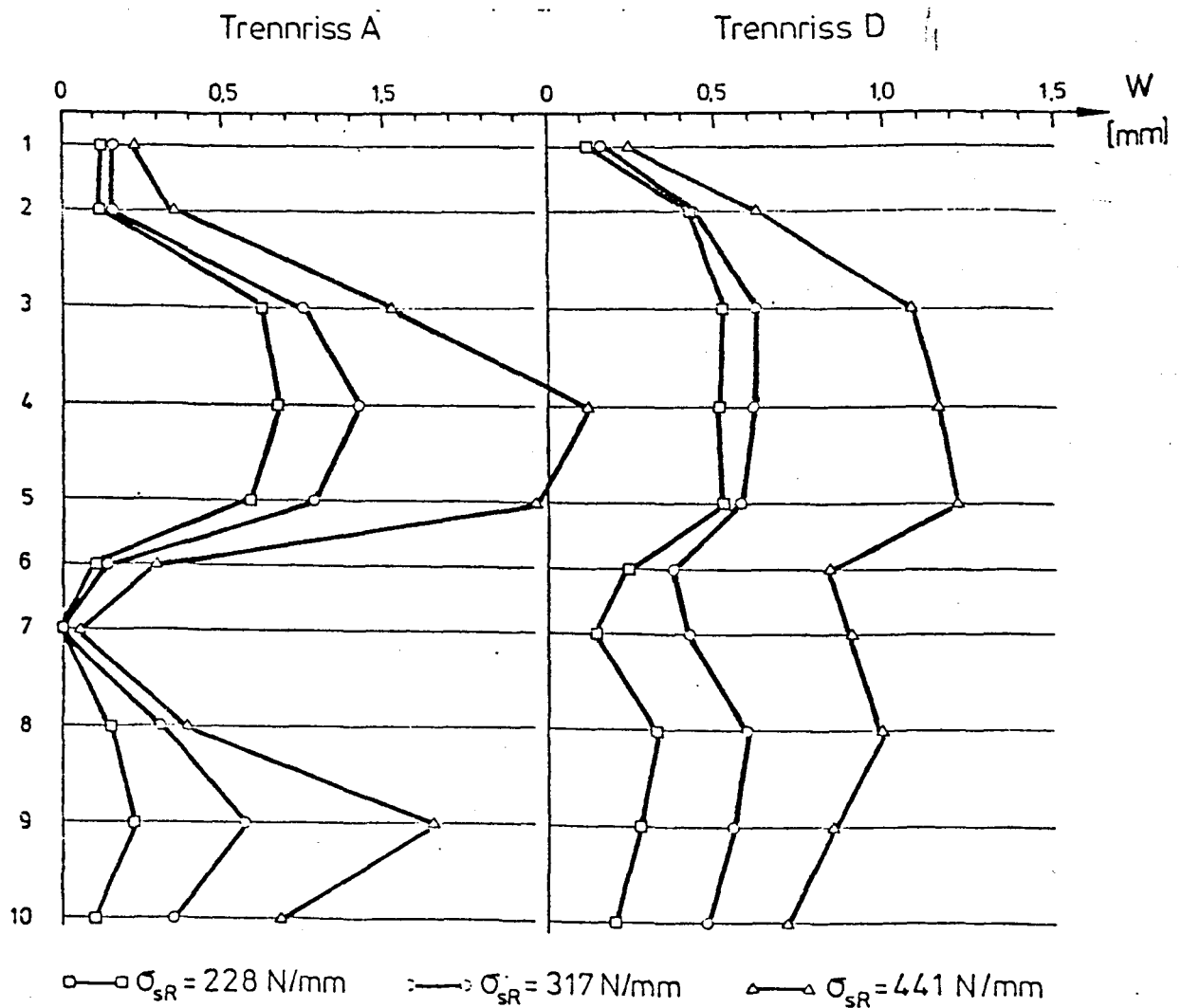
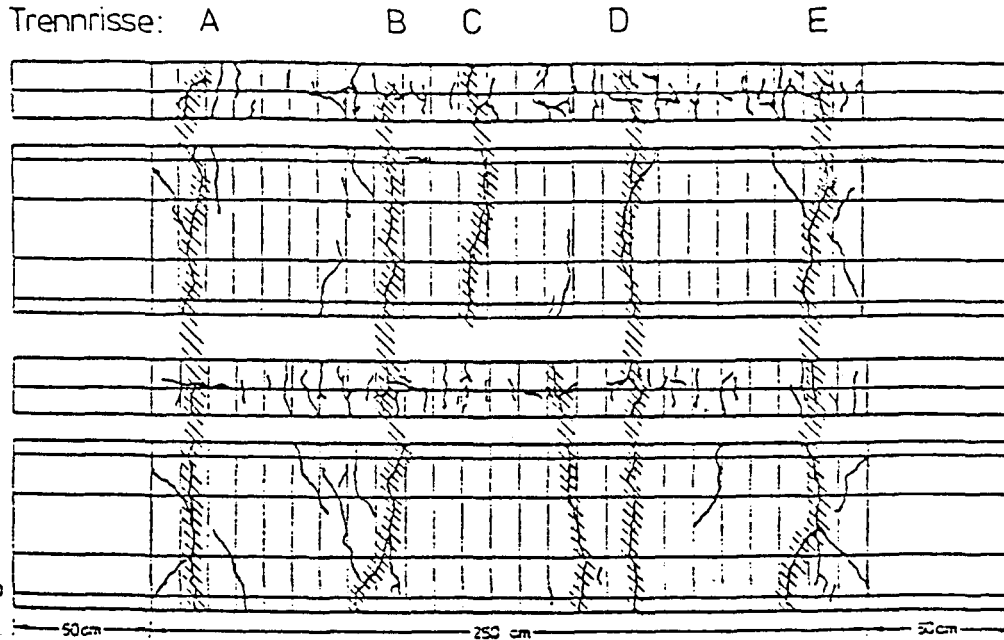


Abbildung 6.59: Kennzeichnung der Trennrisse, Breite zweier Trennrisse über den Umfang; Versuchskörper ZK 28/1,5

ZK 10/0

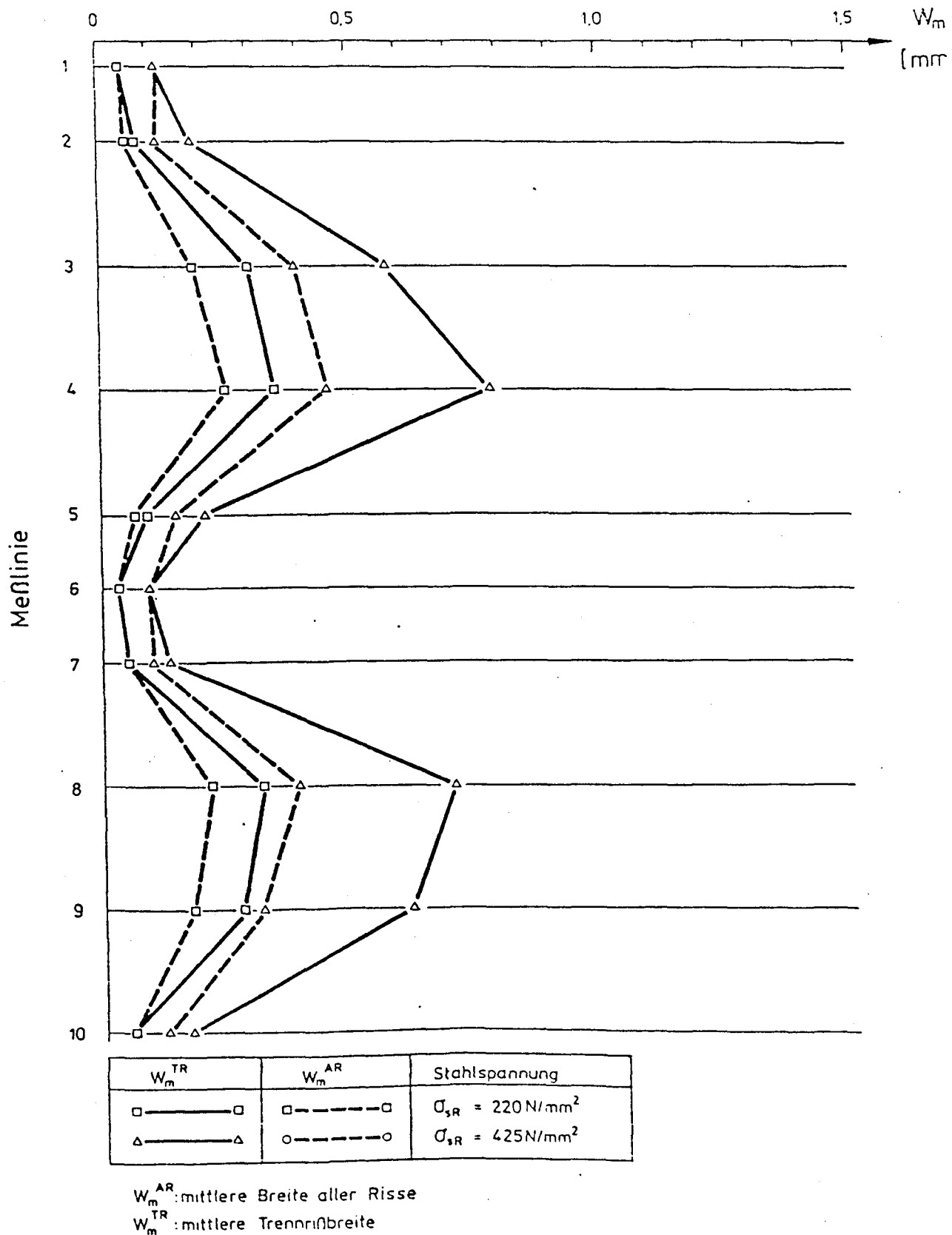
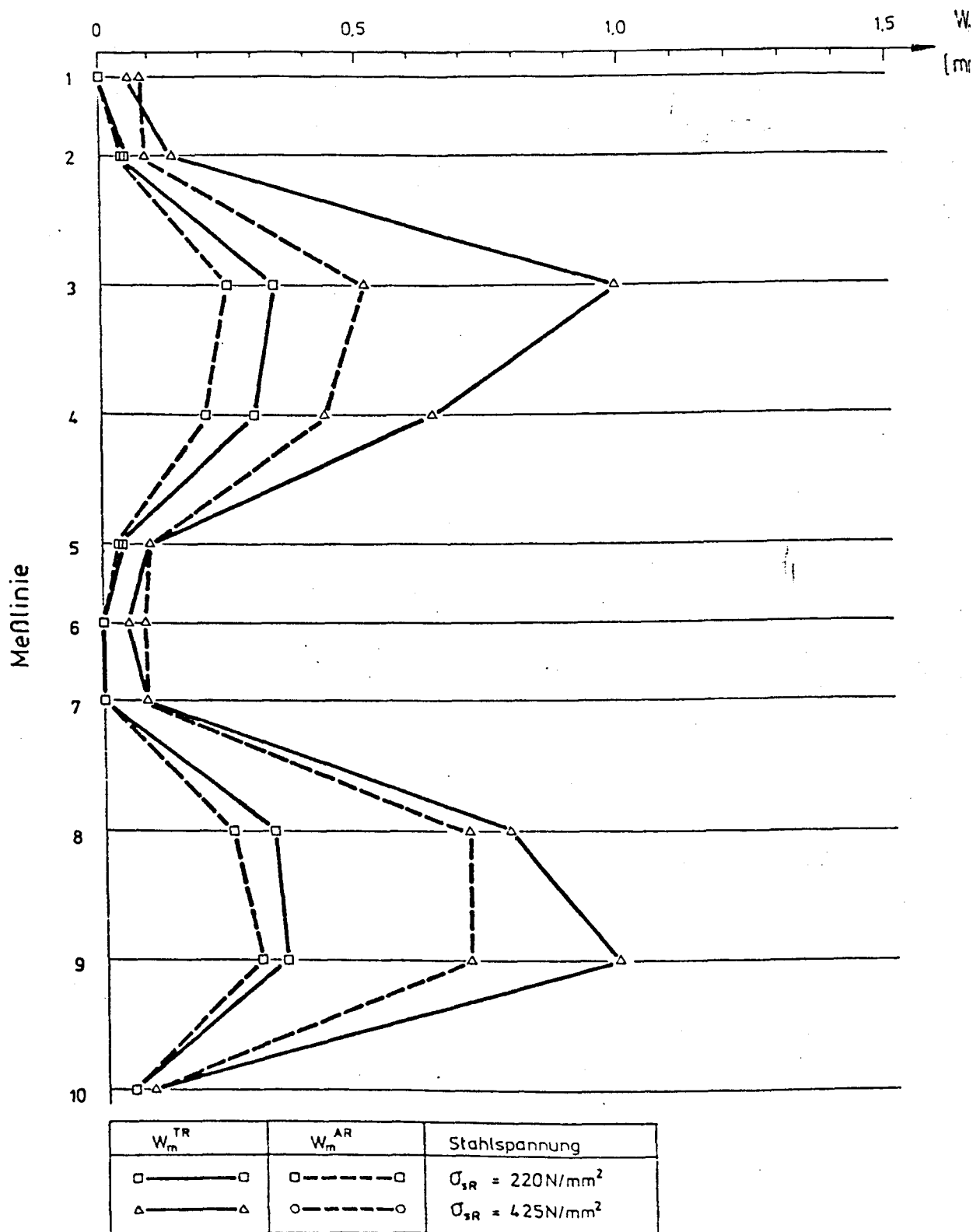


Abbildung 6.60: Vergleich der mittleren Trennrißbreite W_m^{TR} mit der mittleren Rißbreite W_m^{AR} aller Risse, Versuchskörper ZK 10/0

ZK 10/1,5



W_m^{AR} : mittlere Breite aller Risse
 W_m^{TR} : mittlere Trennrissbreite

Abbildung 6.61: Vergleich der mittleren Trennrissbreite W_m^{TR} mit der mittleren Rißbreite W_m^{AR} aller Risse, Versuchskörper ZK 10/1,5

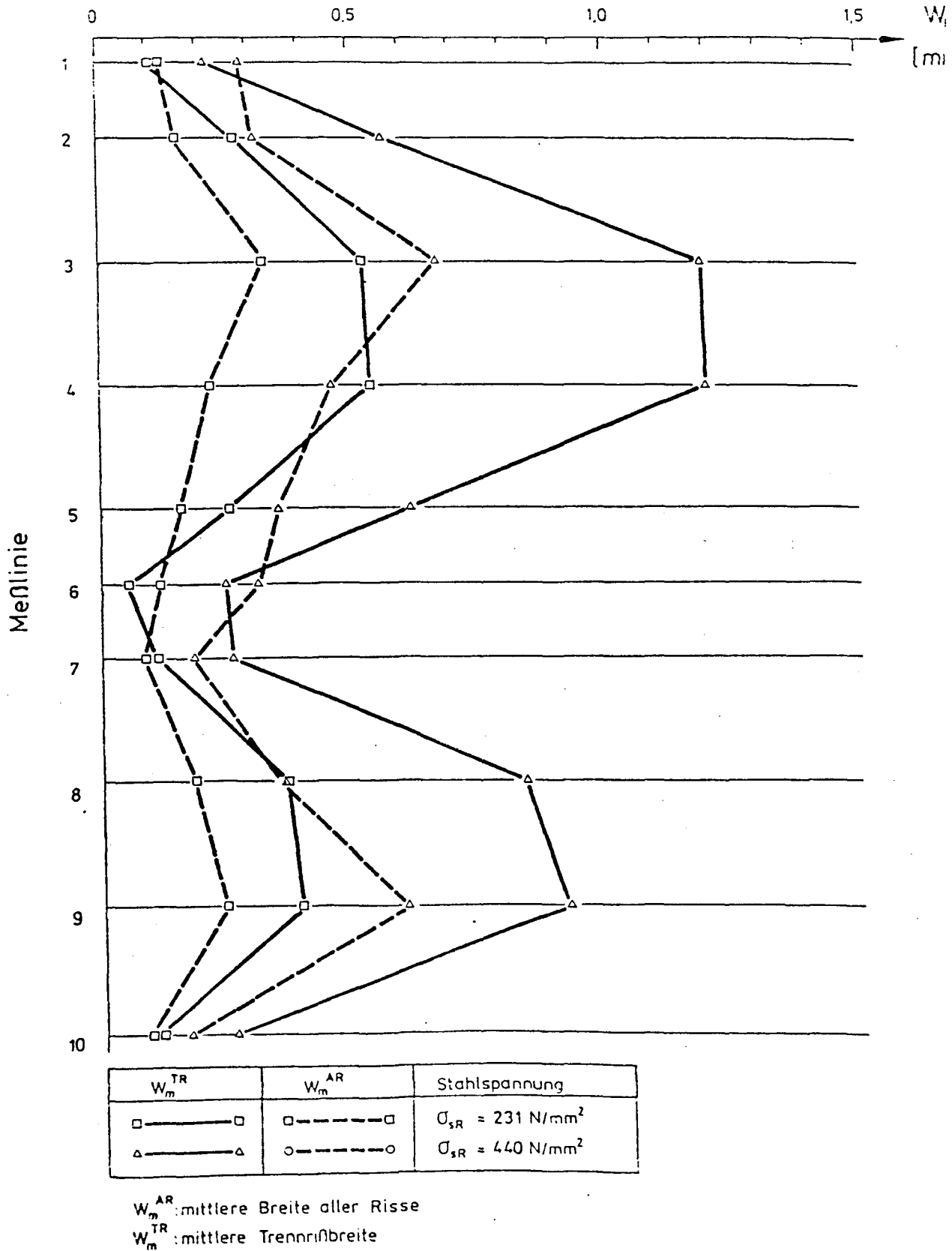
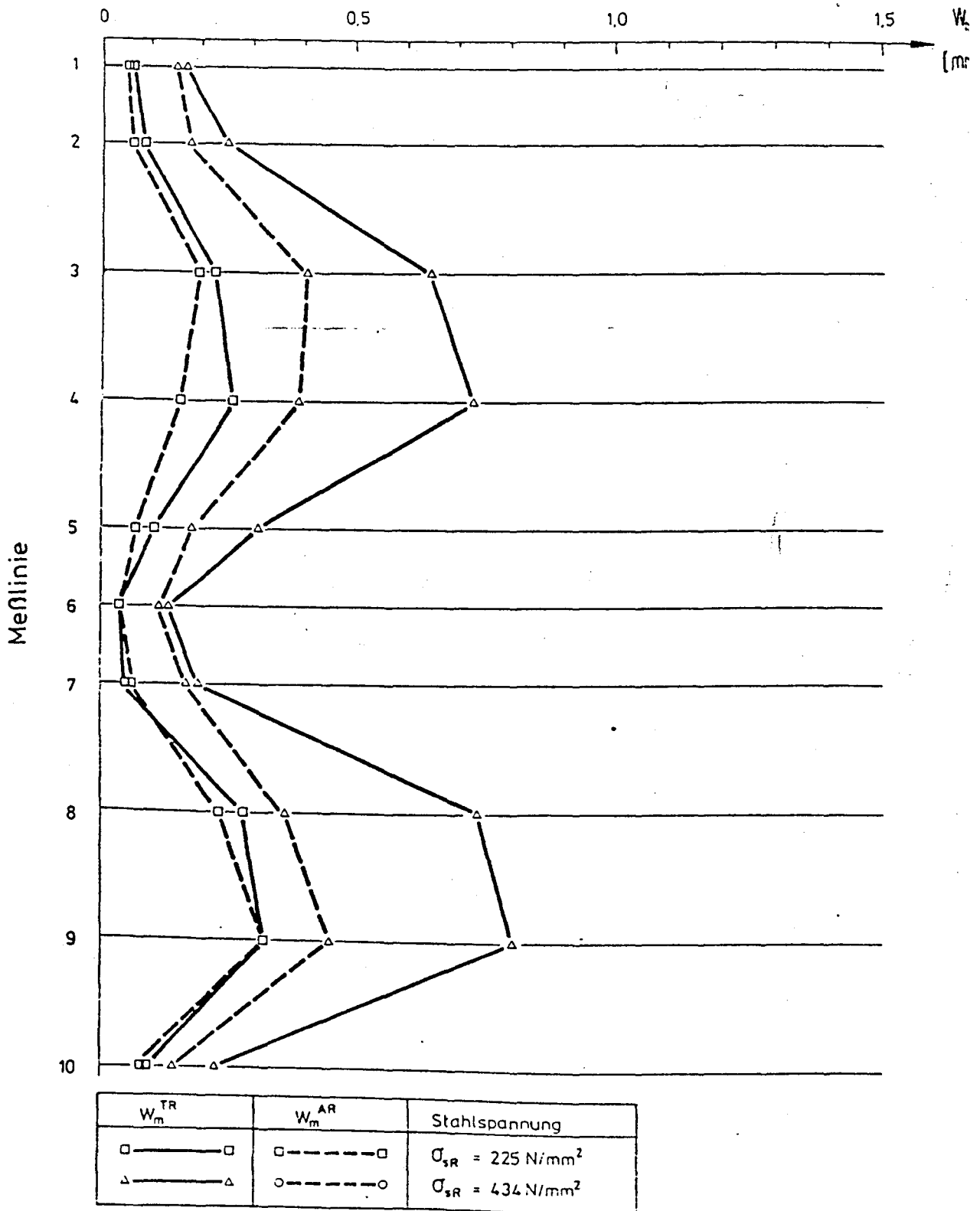


Abbildung 6.62: Vergleich der mittleren Trennrißbreite W_m^{TR} mit der mittleren Rißbreite W_m^{AR} aller Risse, Versuchskörper ZK 20/0

ZK 20/1,5



W_m^{AR} : mittlere Breite aller Risse
 W_m^{TR} : mittlere Trennrißbreite

Abbildung 6.63: Vergleich der mittleren Trennrißbreite W_m^{TR} mit der mittleren Rißbreite W_m^{AR} aller Risse, Versuchskörper ZK 20/1,5

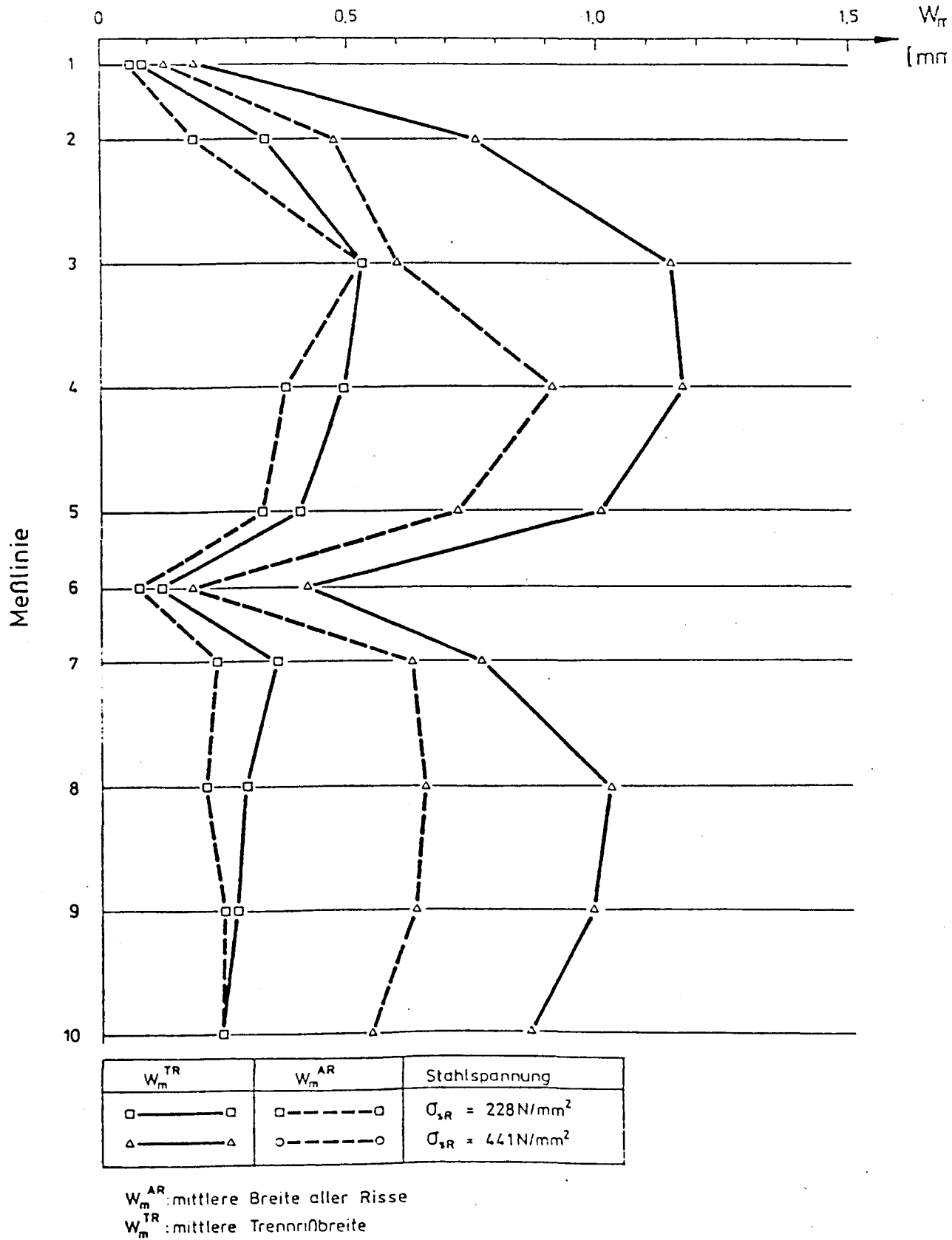


Abbildung 6.64: Vergleich der mittleren Trennrissbreite W_m^{TR} mit der mittleren Rissbreite W_m^{AR} aller Risse, Versuchskörper ZK 28/1,5

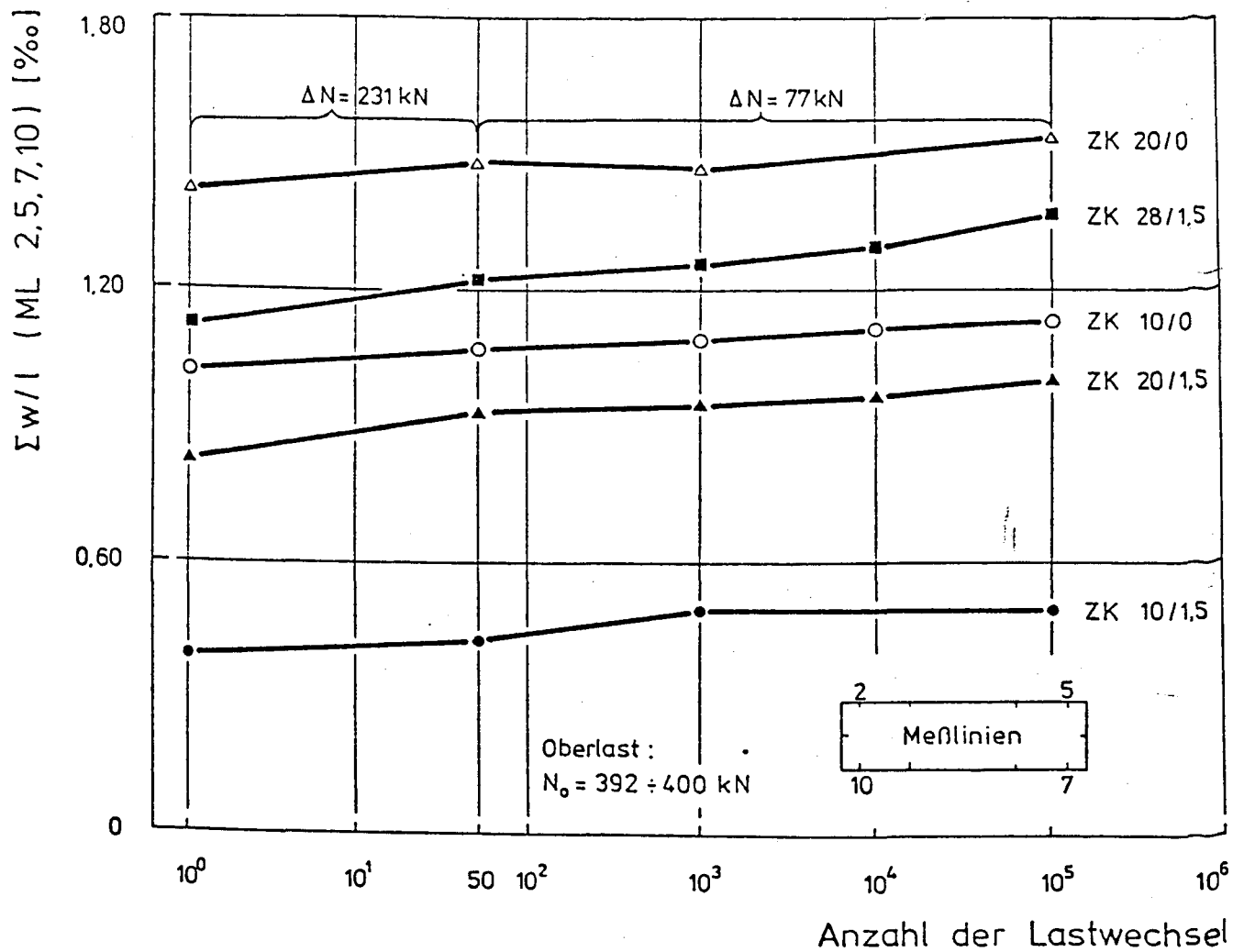


Abbildung 6.65: Verlauf der bezogenen Rißbreiten-Summe $\Sigma w/l$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel

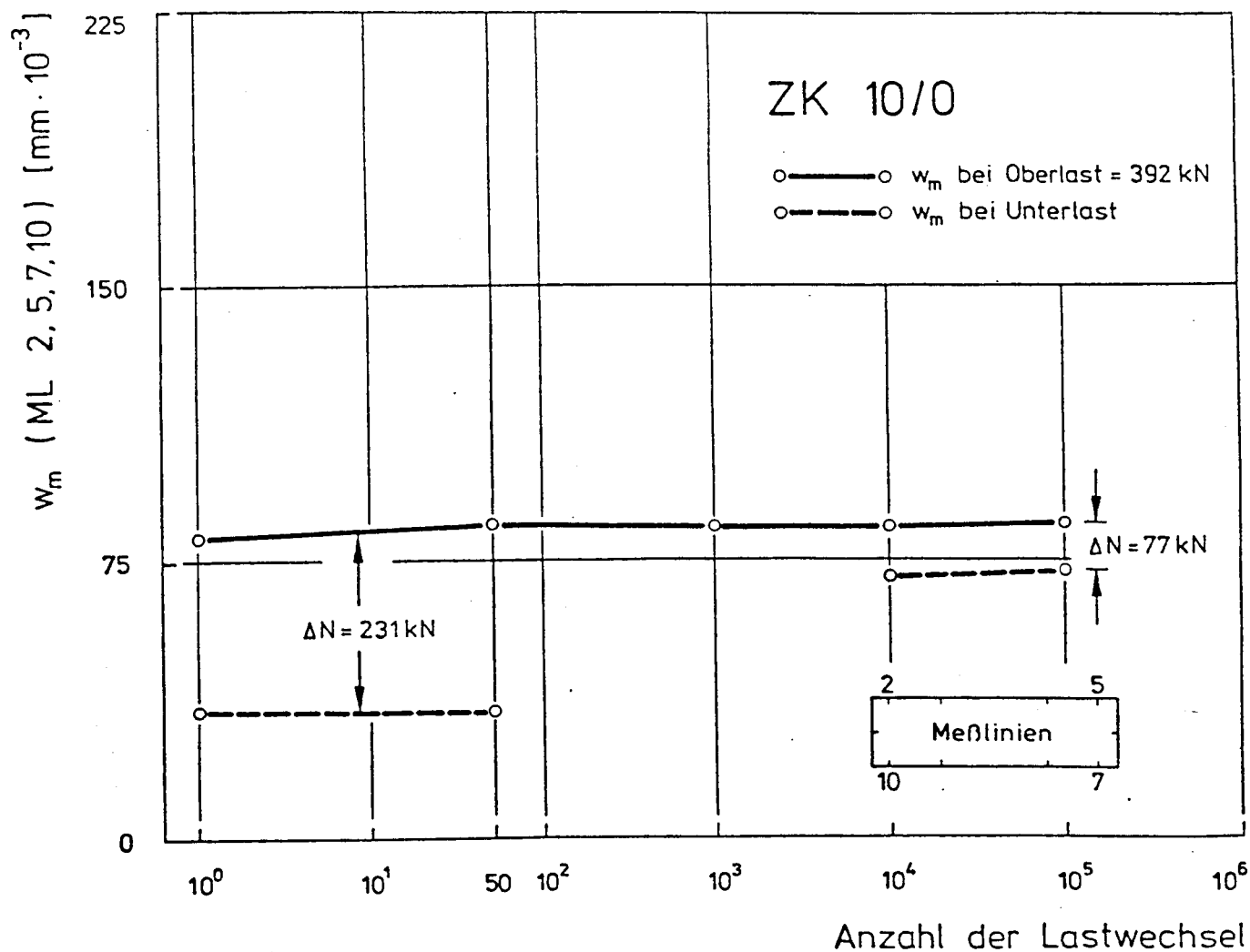


Abbildung 6.66: Mittlere Rißbreite w_m auf den Meßlinien 2, 5, 7 und 10 in Abhängigkeit von der Lastwechselanzahl, Versuchskörper ZK 10/0

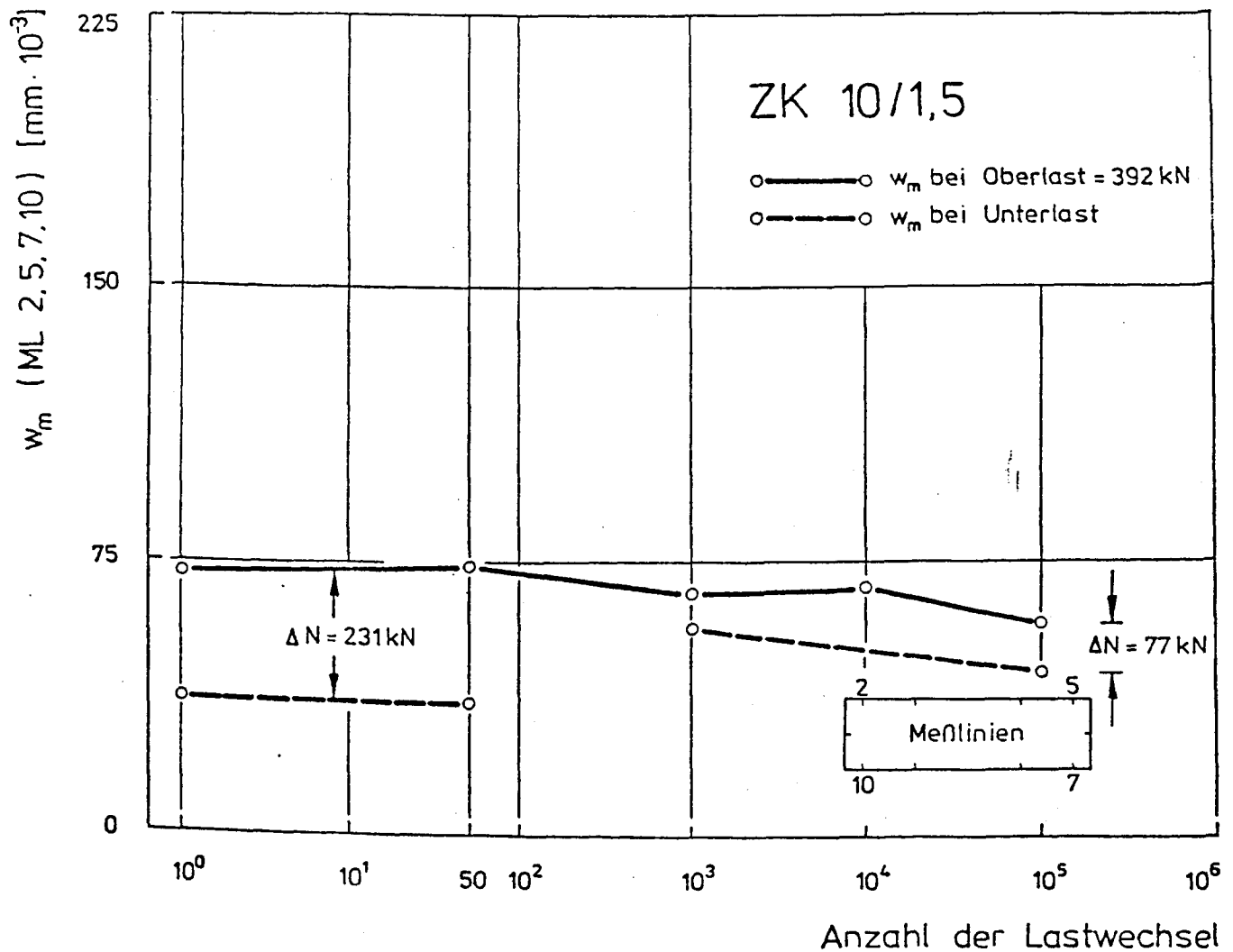


Abbildung 6.67: Mittlere Rißbreite w_m auf den Meßlinien 2, 5, 7 und 10 in Abhängigkeit von der Lastwechselanzahl, Versuchskörper ZK 10/1,5

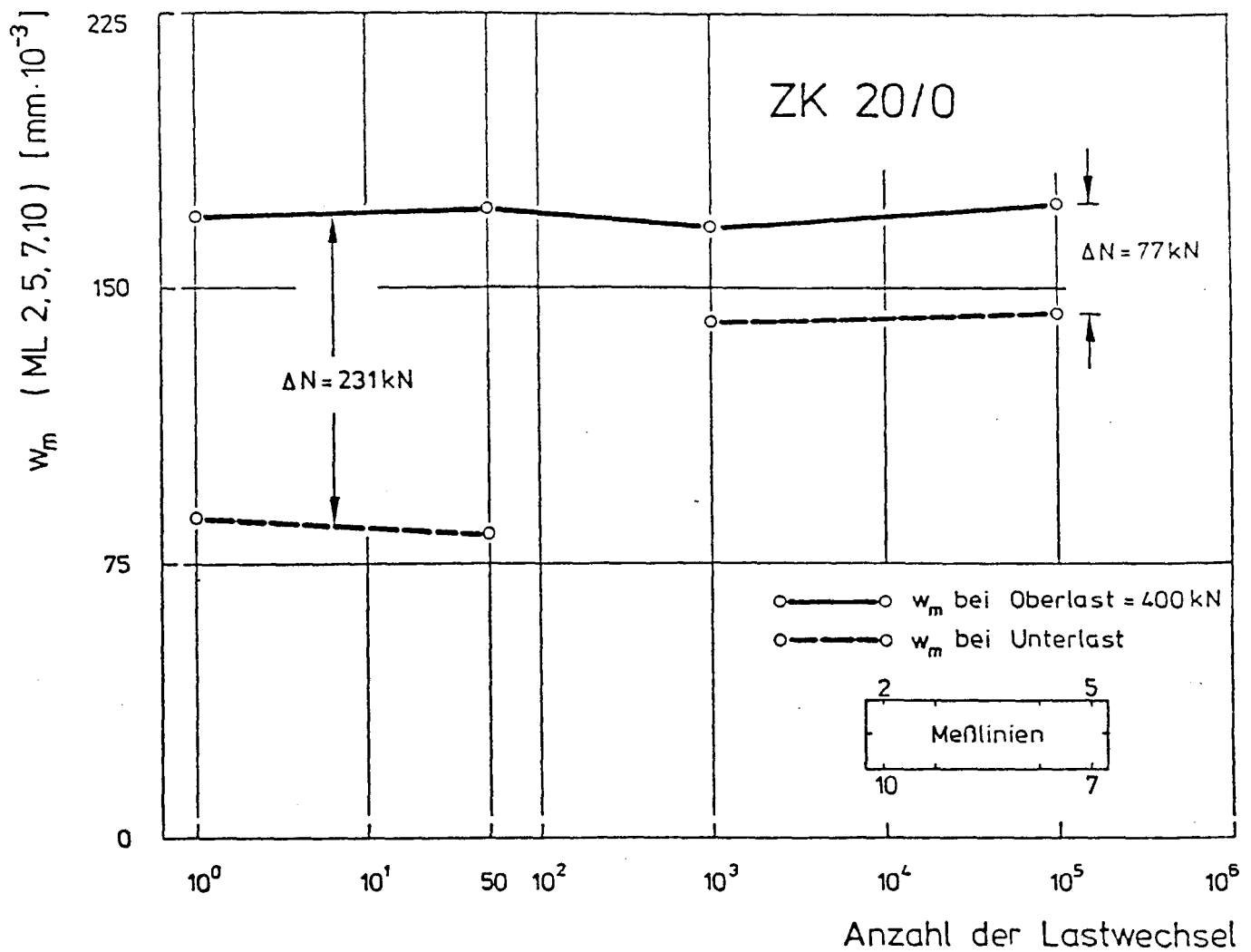


Abbildung 6.68: Mittlere Rißbreite w_m auf den Meßlinien 2, 5, 7 und 10 in Abhängigkeit von der Lastwechselanzahl, Versuchskörper ZK 20/0

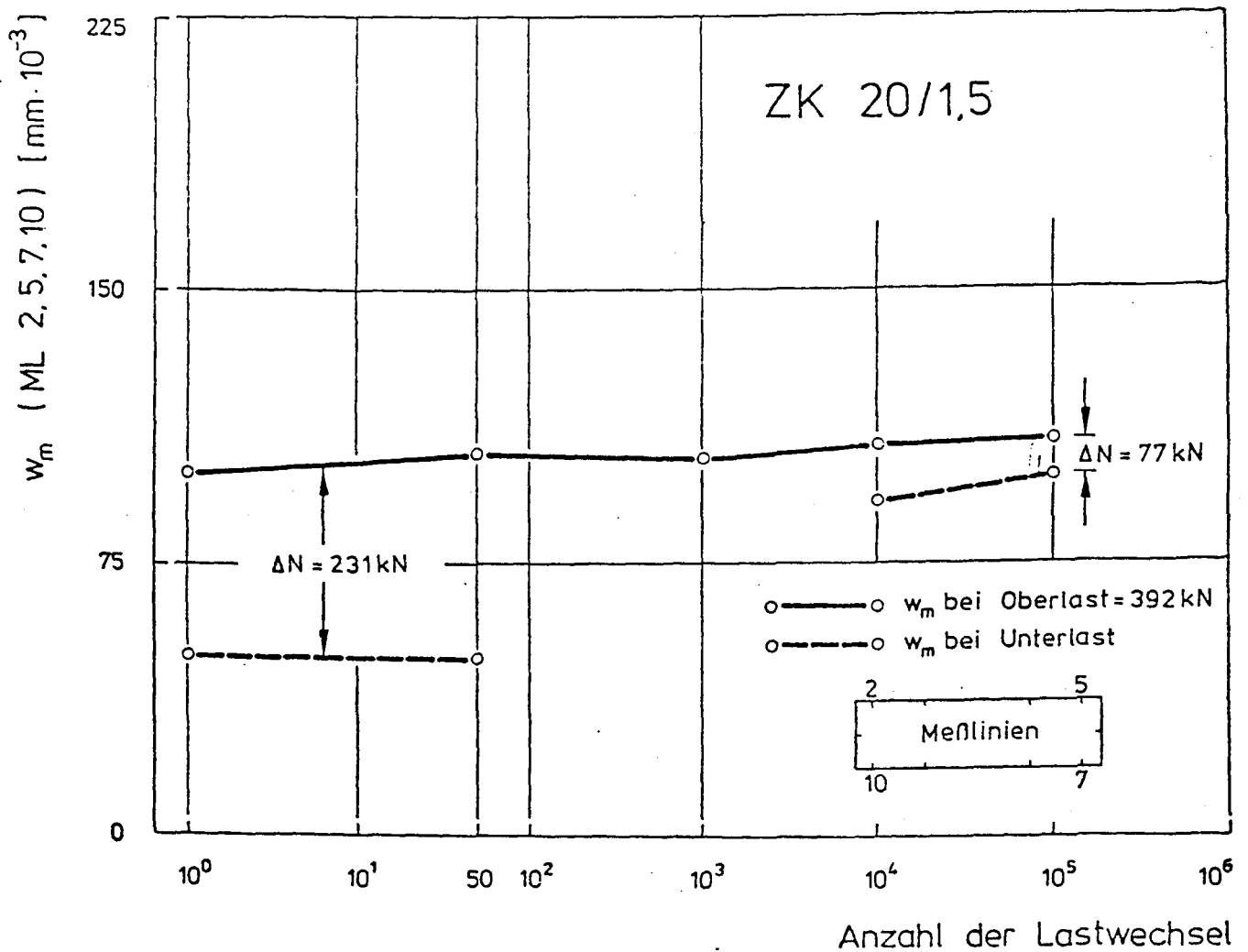


Abbildung 6.69: Mittlere Rißbreite w_m auf den Meßlinien 2, 5, 7 und 10 in Abhängigkeit von der Lastwechselanzahl, Versuchskörper ZK 20/1,5

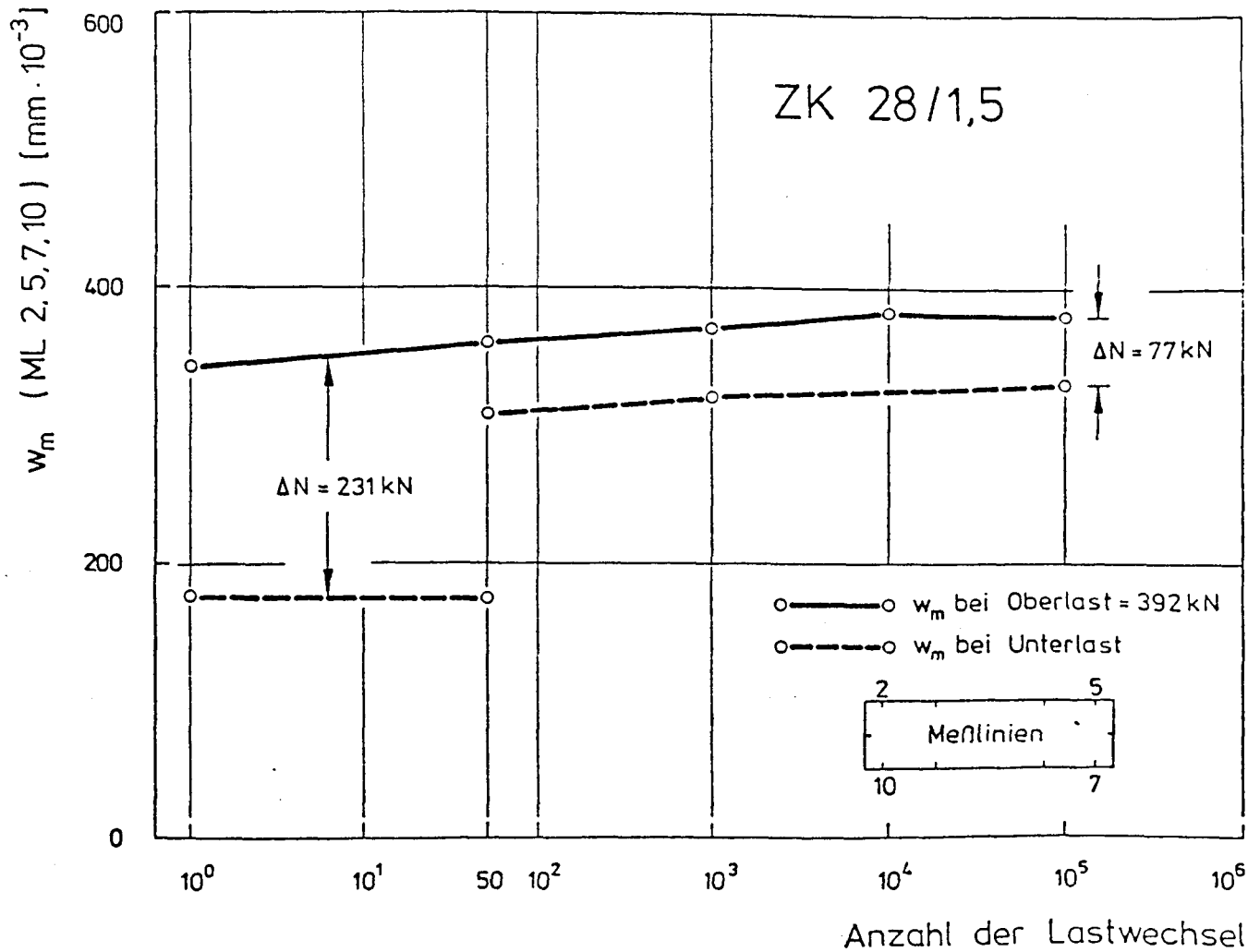


Abbildung 6.70: Mittlere Rißbreite w_m auf den Meßlinien 2, 5, 7 und 10 in Abhängigkeit von der Lastwechselanzahl, Versuchskörper ZK 28/1,5

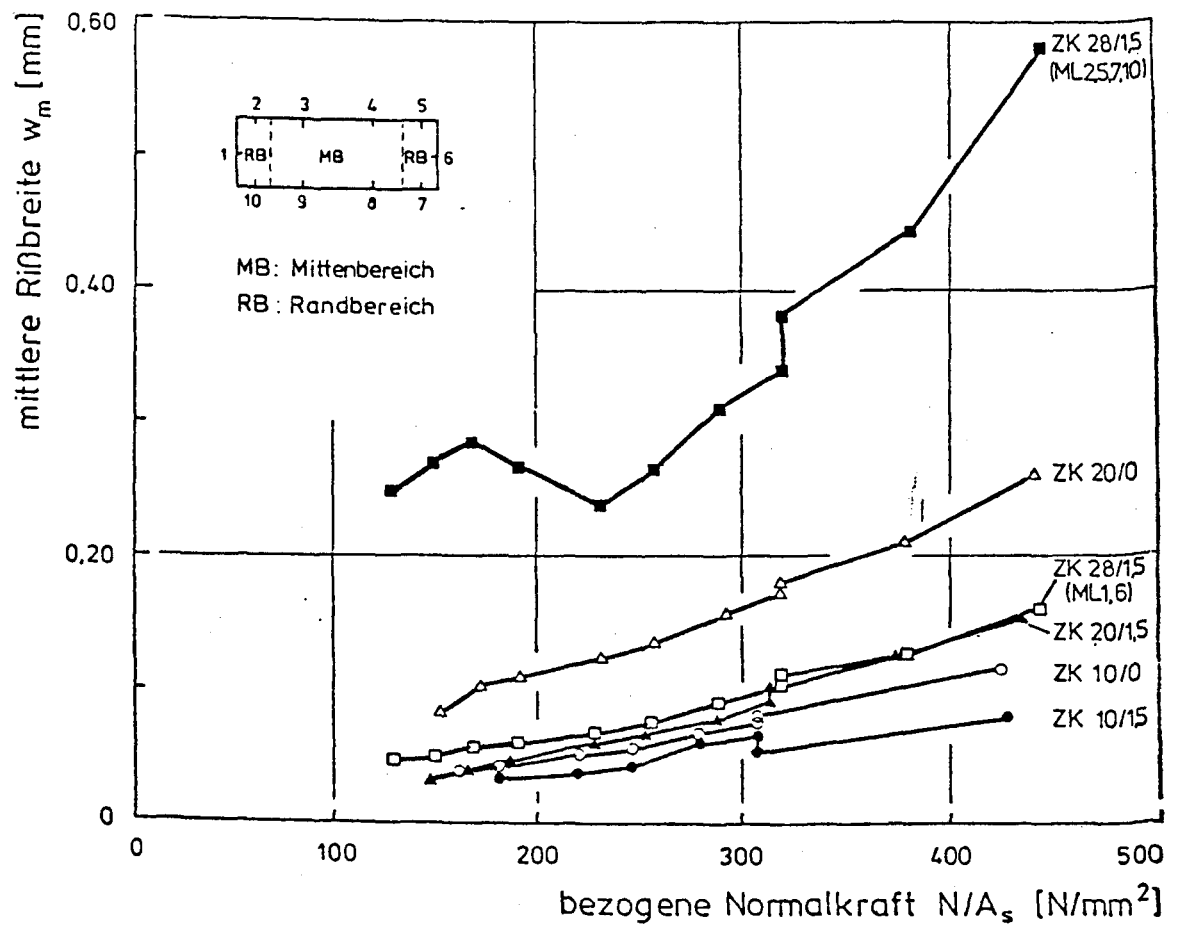


Abbildung 6.71: Mittlere Rißbreite im Randbereich in Abhängigkeit von der Beanspruchung

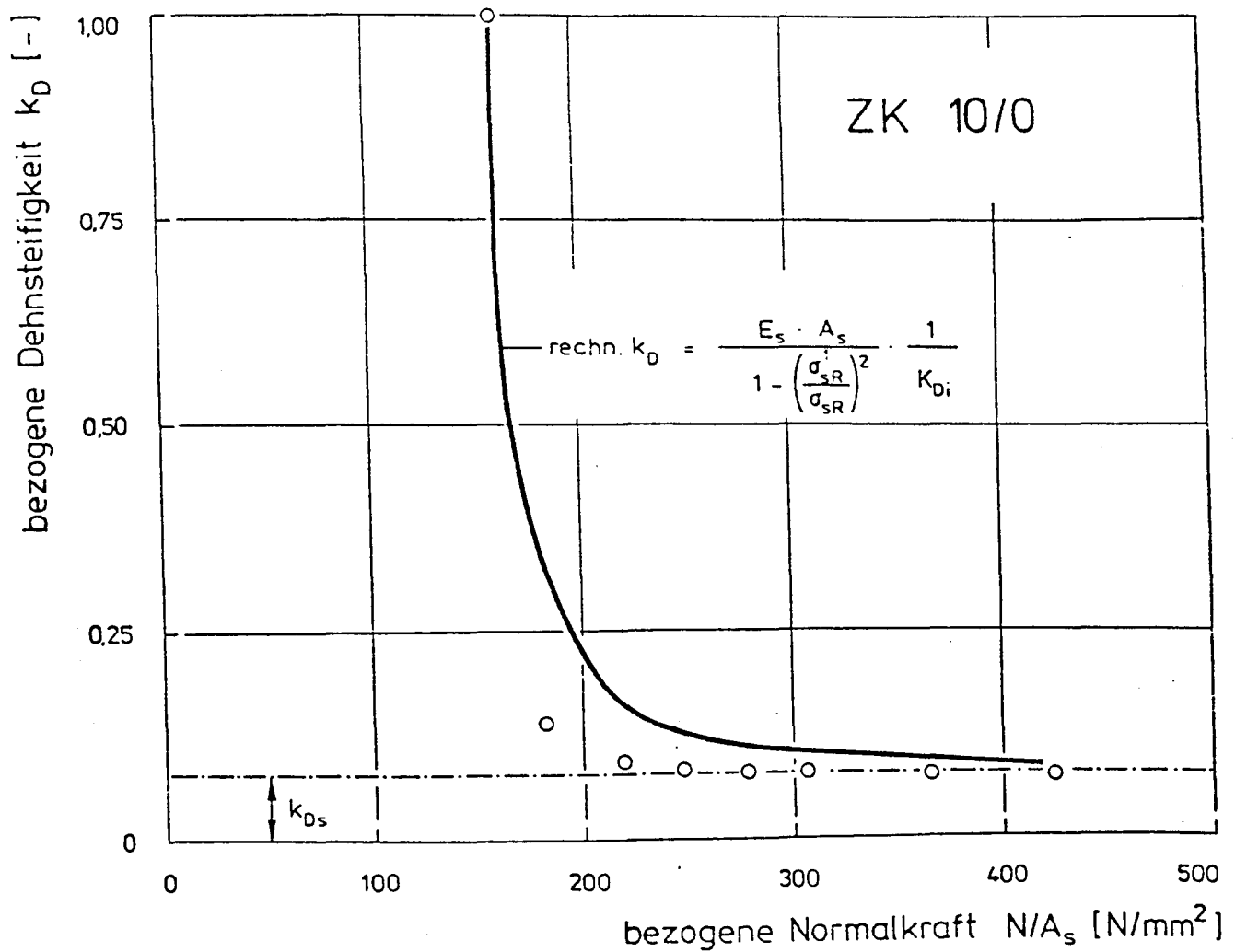


Abbildung 6.72: Rechnerische und gemessene bezogene Dehnsteifigkeit, Versuchskörper ZK 10/0

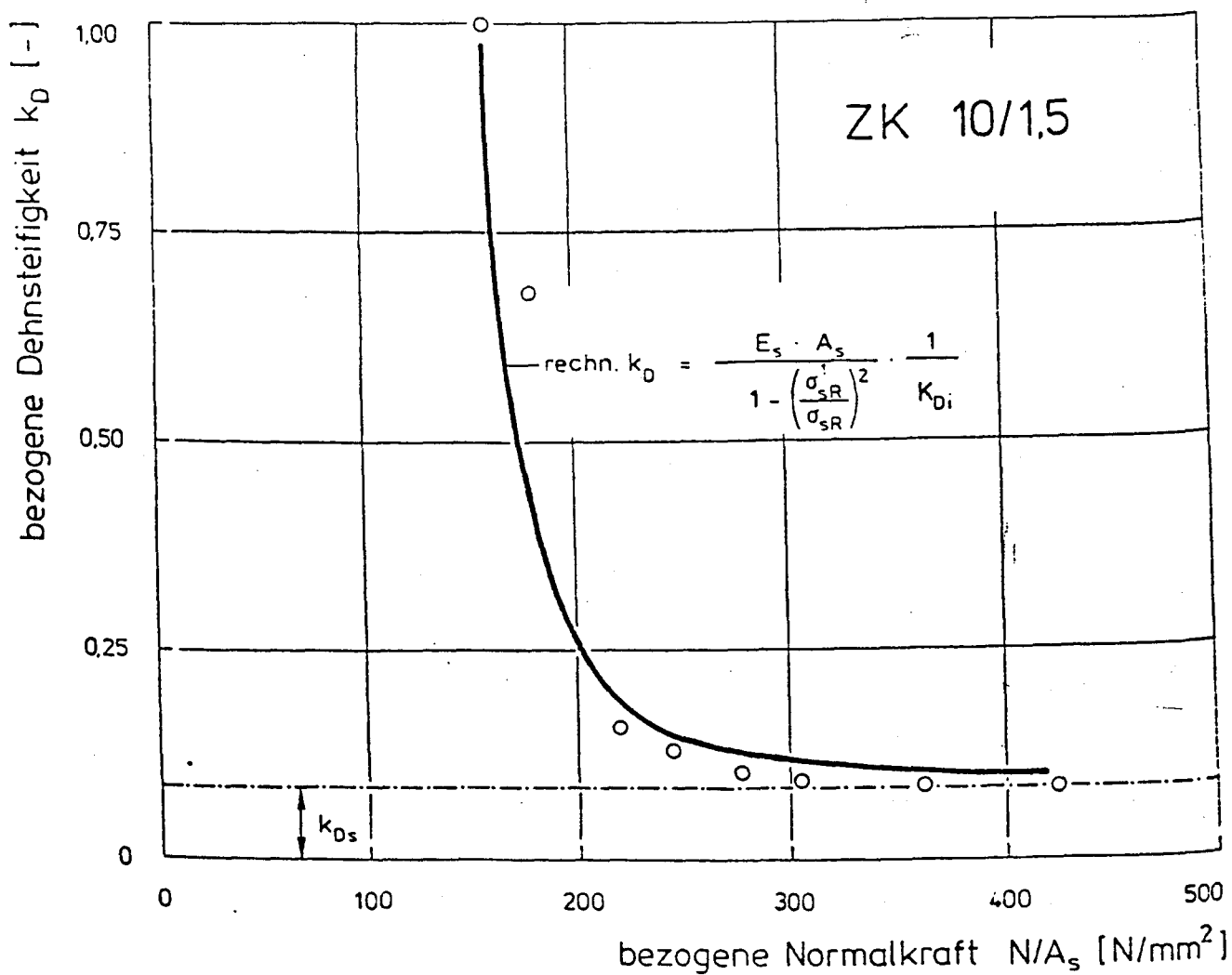


Abbildung 6.73: Rechnerische und gemessene bezogene Dehnsteifigkeit, Versuchskörper ZK 10/1,5

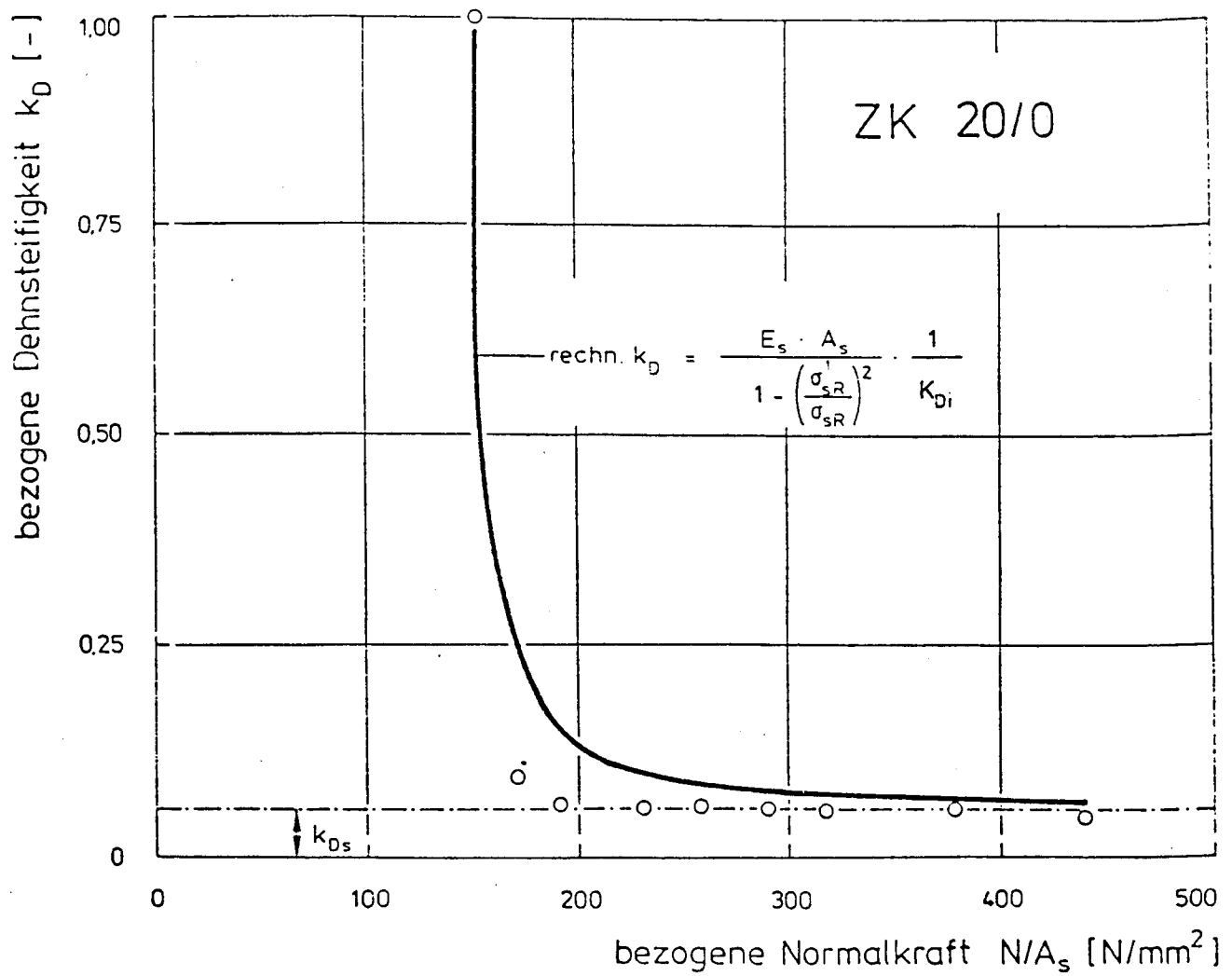


Abbildung 6.74: Rechnerische und gemessene bezogene Dehnsteifigkeit, Versuchskörper ZK 20/0

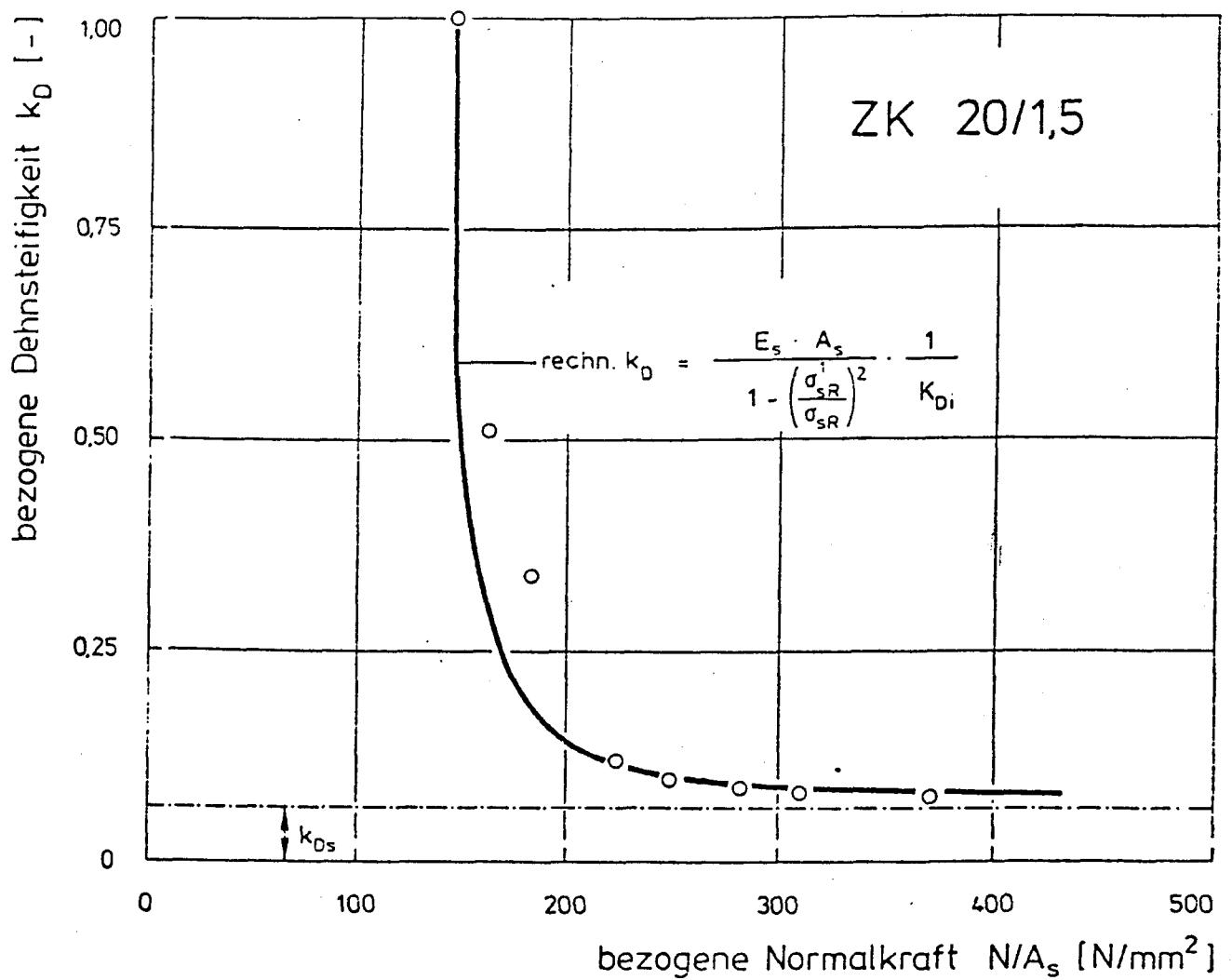


Abbildung 6.75: Rechnerische und gemessene bezogene Dehnsteifigkeit, Versuchskörper ZK 20/1,5